

Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Stavební hmoty a diagnostika staveb

**Studium soudržnosti vybraných typů hornin a alkalicky aktivované vysokopecní
strusky**

Study of cohesion of selected rock type with alkali activated blast furnace slag

Diplomová práce

Autor:

Bc. Michal Hrbek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Mec

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Hrbek**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Studium soudržnosti vybraných typů hornin a alkalicky aktivované
vysokopecní strusky**
**Study of cohesion of selected rock type with alkali activated blast
furnace slag**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Vybrané typy hornin používané pro výrobu kameniva do betonu budou zkoumány z pohledu mechanicko fyzikálních a chemicko strukturních vlastností. Studium vlastností hornin bude zaměřeno především na vlastnosti důležité pro kamenivo do betonu.
2. Ze vzorků hornin bude připraveno kamenivo pro výrobu zkušebních malt. Pojivový systém malt bude tvořen alkalicky aktivovanou vysokopecní struskou a srovnávací směsí s cementem.
3. Vzorky malt budou zkoušeny z hlediska mechanicko fyzikálních vlastností.
4. Vzorky budou také zkoumány z pohledu mikrostruktury se zaměřením na rozhraní kamenivo pojivo.
5. Výsledky budou vyhodnoceny z hlediska použitelnosti jednotlivých typů hornin pro alkalicky aktivované betony a malty.

Seznam doporučené odborné literatury:

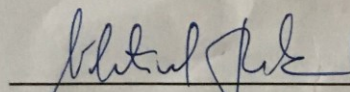
- OLLIVIER, J.P., J.C. MASO a B. BOURDETTE. Interfacial transition zone in concrete. Advanced Cement Based Materials [online]. 1995, 2(1), 30-38
- SHI, C. a P. XIE. Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars. Cement and Concrete Research [online]. 1998, 28(6), 887-896
- SAN NICOLAS, Rackel a John L. PROVIS. The Interfacial Transition Zone in Alkali-Activated Slag Mortars. Frontiers in Materials [online]. 2015, 2
- LEE, W.K.W a J.S.J VAN DEVENTER. The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers. Cement and Concrete Research [online]. 2004, 34(2), 195-206
- Strubkle, L., Skalný, J.: A review of the cement-aggregate bond, Cement and Concrete Research 1980(10)
- Roy, D. M., Grutzeck, M.W., Shi, D., Lui, G.: Cement paste aggregate interface microstructure, The Pennsylvania state university, 1993, Washington
- Scrivener, K. L., Crumby, A.K., Laugesen, P.: The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete, Interface science, 12, pp. 411-421, 2004, Springer

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

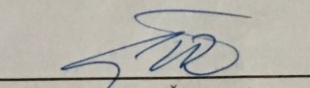
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Mec**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017

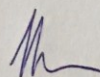

doc. Ing. Vlastimil Bůek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30. 11. 2017



.....
Podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě 30. 11. 2017

Anotace:

HRBEK, Michal. Studium soudržnosti vybraných typů hornin a alkalicky aktivované vysokopecní strusky, 2017. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 63 stran. Vedoucí práce Ing. Pavel Mec.

Díky svým dobrým výsledkům je alkalické aktivace druhotných materiálů stále aktuální téma. Pochopením principu alkalické aktivace by mohlo vést ke zlepšení vlastností pojiv na bázi cementu.

Cílem této diplomové práce je sledovat měnící se chemické složení pojiva se zvětšující se vzdáleností od povrchu zrna kameniva. Diplomová práce porovnává směs s aktivovanou vysokopecní struskou a směs s portlandským cementem. Bylo použito několik druhů kameniva.

Klíčová slova:

Alkalicky aktivovaný, vysokopecní struska, aktivátor, cement, lokální horniny

Summary:

Because of good results, alkali activation is still very popular topic. Understanding principle of alkali activated system can lead to improve properties of cement-based binders.

Aim of this thesis is to track changing chemical composition depending on distance from aggregate surface. This work will compare mixtures with alkali activated ground blast furnace slag and mixture with portland cement. Several of aggregate was used.

Keywords:

Alkali activated, blast furnace slag, activator, cement, local rocks

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Historie a současný stav problematiky	2
3	Podstata alkalicky aktivovaných latentně hydraulických látek	3
4	Struska	4
5	Princip alkalické aktivace stusky	7
6	Mezisložková přechodová zóna.....	8
7	Alkalické aktivátory.....	9
8	Portlandský cement.....	10
9	Použité kamenivo.....	10
9.1	Žula	10
9.2	Stavební recyklát.....	11
9.3	Amfibolit.....	12
9.4	Krystalický vápenec.....	12
9.5	Travertin.....	13
10	Experimentální část.....	14
11	Příprava vzorků.....	14
11.1	Příprava kameniva	14
11.2	Záměsová voda	15
11.3	Vysokopeční struska	15
11.4	Aktivátor	15
11.5	Příprava vzorků na zkoušení pevnosti	16
12	Metodika zkoušení.....	17
12.1	Zkoušení základních vlastností kameniva	17

12.2	Zkoušení fileru kameniva	19
12.3	Zkoušení trámečků na pevnost v tahu za ohybu	20
12.4	Zkoušení na pevnost v tlaku	22
13	Kvantitativní analýza	23
13.1	Příprava vzorků.....	23
13.2	Podmínky zkoušení.....	24
14	Mikroskopická analýza	24
14.1	Příprava vzorků na elektronový mikroskop.....	25
14.2	Podmínky měření	28
15	Výsledky	29
15.1	Výsledky měrné hmotnosti fileru kameniva	29
15.2	Výsledky základních vlastností kameniva.....	30
15.3	Rozměry a objemová hmotnost	31
15.4	Výsledky mechanických vlastností.....	34
15.5	Výsledky práškové rentgenové difrakce.....	37
15.5.1	Recyklát	38
15.5.2	Žula	39
15.5.3	Travertin.....	40
15.5.4	Amfibolit.....	40
15.5.5	Vápenec	41
15.6	Výsledky mikroskopické analýzy	41
16	Závěr	48
	Seznam použité literatury	51
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek	55

Seznam grafů	56
Seznam vzorců	56
Seznam příloh	57

1 Úvod

Výroba cementu je spjata s uvolňováním velkého množství oxidu uhličitého do ovzduší. Zátěží není jen vysoká spotřeba energie, ale také proces rozkladu vápence. Proto je v zájmu najít alternativy k cementovým pojivům.

Jedna z možností jsou alkalicky aktivované systémy, u kterých jako pojivo slouží velkoobjemové druhotné suroviny z průmyslu. Pro proces aktivace je potřeba dosáhnout alkalického prostředí pomocí aktivátoru. Po smíchání aktivátoru a směsi dojde k chemické reakci, jejíž princip ještě není zcela odhalen. Výsledkem je velmi pevný, chemicky stabilní a ekologicky šetrný beton.

V této diplomové práci je použita jemně mletá vysokopecní struska a funkci aktivátoru plní vodní sklo upravené hydroxidem sodným.

Úkolem diplomové práce byla příprava surovin na výrobu vzorků. Vzorky poté byly odzkoušeny na mechanické vlastnosti. Byly zjištěny základní vlastnosti kameniva a také mineralogické složení pomocí rentgenové difrakce. Použito bylo 5 druhů kameniva.

Hlavním cílem diplomové práce je mikroskopická analýza, konkrétně sledování mezisložkové tranzitní zóny, což je oblast v blízkosti hrany kameniva s pojivem. Sledováno bylo měnící se chemické složení v této oblasti.

Výsledky alkalicky aktivované směsi s vysokopecní struskou byly porovnány se vzorky, u kterých byl jako pojivo použit portlandský cement.

Dobré výsledky předešlých výzkumů slibují dobrou budoucnost alkalicky aktivovaným směsím.

2 Historie a současný stav problematiky

První aktivovaná vysokopeční struska s hydroxidem sodným je zaznamenána již ve 40. letech 19. století, kdy vzniká alkalicky aktivovaný cement. Tím také začala třetí generace pojiv po vápnu a portlandském cementu. Alkalicky aktivovaná pojiva jsou díky svým vlastnostem vhodná jako alternativa k tradičním portlandským cementům a to zejména pro svou vysokou pevnost, nízkou uhlíkovou stopu a teplotní stabilitu.

Množství využití těchto alkalicky aktivovaných pojiv sepsal již prof. Krivenko a to pro zemědělství, stavebnictví, hlubinné dobývání, průmysl, nakládání s odpady a mnoho dalších. [10]

Z teoretického hlediska je možné aktivovat jakýkoliv materiál s obsahem křemíku a hliníku. S postupujícím výzkumem byly využívány materiály jako vysokopeční struska, popílek, metakaolín a kaolinit. Složením primárních surovin lze rozlišit dva systémy: $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ a $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. V prvním případě jde o aktivaci vysokopeční strusky (Si + Ca) s mírně alkalickým roztokem, kdy je výsledkem C-S-H gel. V druhém případě alkalické aktivace (Si + Ca) je typickým případem metakaolín nebo popílek. Po aktivaci se středně až vysoce alkalickým roztokem vzniká zeolitický polymer. Prof. Davidovits výsledek druhé struktury pojmenoval geopolymery. [9] [13]

Známou teorií od prof. Davidovitsa je, že princip alkalické aktivace byl znám již starým Egypťanům a Římanům. Svou teorii zakládá na tom, že stavby, které se v té době stavěly, obsahují hlinito-křemičitanové hydráty které obsahuje také portlandský cement. Stavby také obsahují krystalické fáze analcitu, což je přírodní kámen, který je velmi odolný a mohl by vysvětlovat extrémní životnost těchto staveb. [10]

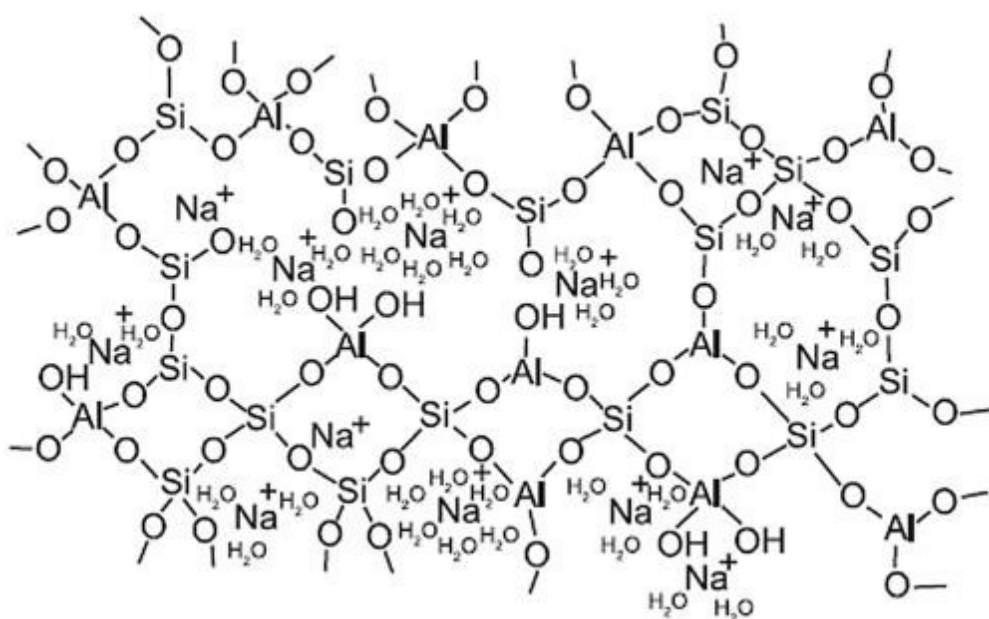
Z důvodu dobrých charakteristických vlastností jsou objevené druhy cementů oblíbené po celém světě a struska se stala typickou přísadou v cementu.

Materiály vhodné k alkalické aktivaci jsou jílové minerály, které se běžně vyskytují v zemské kůře. Ložiska, která pro svou aktivaci již nepotřebují zásah lidské ruky, jsou k nalezení jen na dvou místech na světě, a to v Austrálii a v České republice.

3 Podstata alkalicky aktivovaných latentně hydraulických látek

Tuhnutí a tvrdnutí alkalicky aktivovaných směsí a jejich mechanismus není do dnešní doby zcela vysvětlen a to také z důvodu, že reakce těchto směsí závisí na dvou proměnných složkách.

Prvním procesem je porušení kovalentních vazeb mezi Si-O-Si a Al-O-Si, což nastává při zvýšení pH. Po porušení kovalentních vazeb probíhá transformace do koloidní fáze, druhým procesem je zpětná akumulace porušených složek. [17]



Obrázek 1 - Teoretická struktura geopolymery [10]

Mnoho vědců se domnívá, že mechanismus souvisí s disociací křemíku, který navazuje na fázi polykondenzace. Jelikož tyto fáze probíhají současně, není možné analyzovat jednotlivé procesy.

Španělský vědec Noelia Granizo zkoumal alkalickou aktivaci metakaolínu, kdy pozoroval rozdílné reakce při použití hydroxidu sodného a v případě, kdy bylo přidáno také vodní sklo. V prvním případě, kdy byl použit pouze hydroxid sodný dochází k rozpuštění fáze, poté k fázi indukční a v neposlední řadě dochází k akumulaci porušených složek. V druhém případě, kdy bylo použito také vodní sklo, dochází k rychlému rozložení složek a k okamžité polykondenzaci. [14]

Další teorií, se kterou přišel vědec Angel Palomo je rozdělení alkalické aktivace na dva druhy. Prvním druhem je aktivace vysokopecní strusky ($\text{Si} + \text{Ca}$), kdy je výsledkem C-S-H gel. V druhém případě je typickým příkladem metakaolín ($\text{Si} + \text{Al}$), který je smíchán se středně až vysoce alkalickým roztokem. Výsledným produktem této aktivace je poté charakteristický polymerický model s vysokou mechanickou odolností. [20]

Publikovány byly také vědecké práce, které analyzovaly reakční teplo při alkalické aktivaci vysokopecní strusky. Výsledkem výzkumu bylo, že množství tepla je úměrné množství sodíku a silikátového modulu. Vyšší silikátový modul a vysoký obsah Na_2O je spojen s vyšším hydratačním teplem. Vědci také tvrdí, že proces začíná s porušením vazeb Ca-O , Mg-O , Si-O-Si , Al-O-Al a Al-O-Si , které zapříčiňují vysoké počáteční hydratační teplo. Zaznamenán byl také druhý výkyv teplot. Ten nastal při formování Si-Al vrstev na celé ploše zrna strusky. [16]

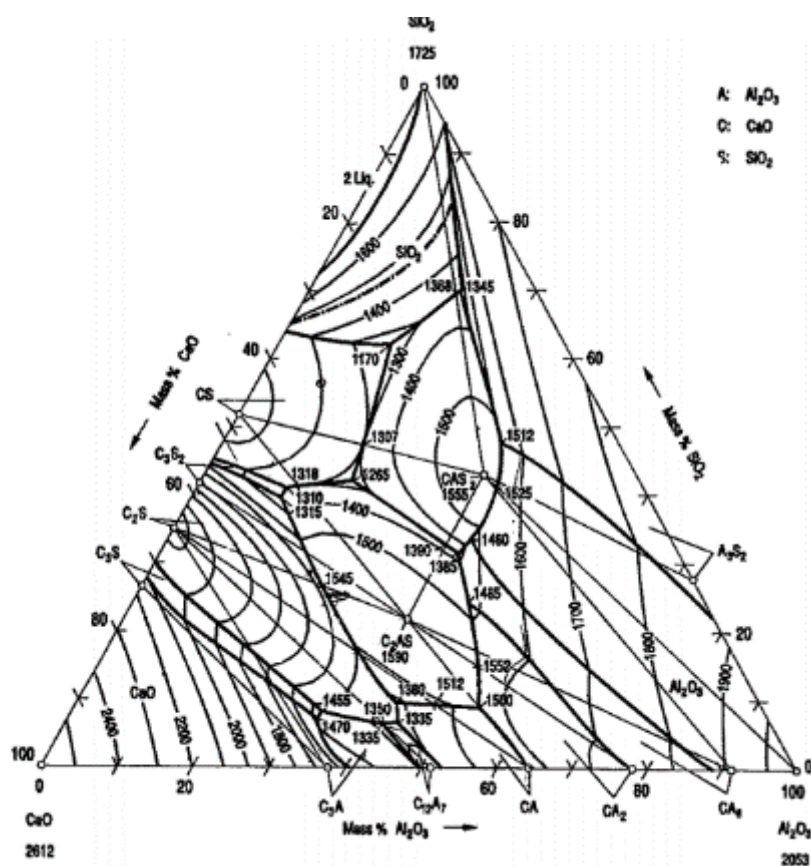
4 Struska

Obecně je struska druhotný materiál při výrobě železa v metalurgii. Složení strusky jsou především nekovové složky vsázky, malé části vyzdívek pecí a také produkty metalurgické reakce. Z technologického hlediska je struska ochranná vrstva v nejvyšší vrstvě vysoké pece, která zabraňuje zpětné oxidaci kovových složek. [28]

Při výrobě železa vzniká tzv. vysokopecní struska, která je cennou surovinou a to pro své relativní složení. V dnešní době se běžně využívá jako příměs do portlandského cementu, kde slouží jako náhrada slínku. Oxidy tvoří většinu složení strusky, nejvýznamnější je oxid křemičitý a oxid vápenatý. Ze zásaditých složek lze nalézt MgO , BaO , FeO , z kyselých pak P_2O_5 , SO_3 , MnO_2 , Sb_2O_5 a v neposlední řadě sloučeniny amfoterní Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 . Lze zde nalézt také malé množství sulfidů a sloučenin fluóru. [28] Složení strusky je závislé na složení vsázky a složení se může výrazně lišit.

Složka	Průměr (% hmot.)	Rozsah (% hmot.)
SiO ₂	36	24-38
Al ₂ O ₃	10	7-15
CaO	39	32-43
MgO	12	3-18
FeO	0,5	0,2-1,6
MnO	0,4	0,2-1,1
TiO	0,7	0,4-2,1
S (jako CaS)	1,4	0,8-1,9

Tabulka 1 – Přibližné chemické složení vysokopecních strusek [19]



Obrázek 2 - Fázový diagram strusky CaO - SiO₂ - Al₂O₃ [29]

Modul zásaditosti M_z (Vzorec 1), který vyjadřuje zásaditost, je nejdůležitější z vlastností strusky. Tento modul vyjadřuje poměr mezi látkovým množstvím zásaditých složek k látkovému množství kyselých nebo amfoterních složek.

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \geq 1,0 \quad (\text{Vzorec 1})$$

Strusky s $M_z > 1$ jsou zásadité. Strusky s $M_z 1,1 - 1,4$ jsou mírně hydraulické. Se zvyšujícím se modulem se zvyšuje také hydraulická struska, struska s modulem zásaditosti 1,7 je velmi zásaditá a hydraulická. Strusky s $M_z < 1$ jsou kyselé. Kyselost hraje důležitou roli při ochlazování. Při chlazení kyselé strusky dochází ke vzrůstu viskozity. Zásadité strusky jsou při chlazení viskózní méně, proto lépe krystalizují a hůře granulují. [24]

Fyzikální vlastnosti jako je hmotnost, zrnitost, velikost částic nebo struktura jsou dány technologickým postupem zpracování strusky. Nejdůležitější vlastností strusky je její tavitelnost, viskozita a entalpie.

Základní fyzikální vlastnosti jsou dány technologickým postupem zpracování strusky. Přibližné hodnoty jsou zmíněny v Tabulka 2 .

Technologické vlastnosti strusky	
Sypná hmotnost (volně sypaná) [kg/m ³]	1200 - 1400
Sypná hmotnost setřesený stav [kg/m ³]	1400 - 1600
Měrná hmotnost [kg/m ³]	2800 - 3000
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1900 - 2800
Nasákavost	do 10%

Tabulka 2 - Technologické vlastnosti strusky [16]

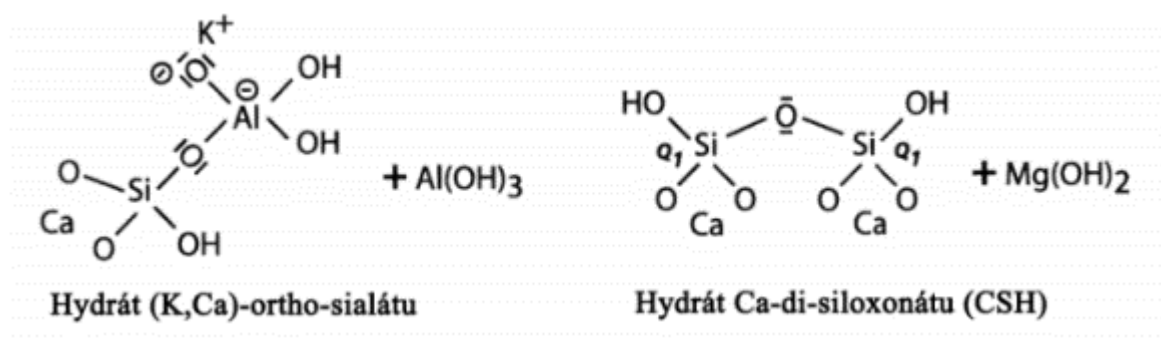
Velké množství amorfnní fáze ve strusce znamená, že je struska latentně hydraulická. Amorfnní fáze vzniká v případě rychlého ochlazení. Pokud se struska dostatečně rychle nevychladí, vzniká krystalická fáze, která latentně hydraulická není. [8]

Na experimentální část této diplomové práce byla použita jemně mletá vysokopecní struska SMŠ 400 firmy Kotouč Štramberk, spol. s r.o. Tato struska je ve shodě s PN 72 2090. Systém řízení jakosti je certifikován dle ČSN EN ISO 9001:2009. Tento certifikát je také součástí přílohy diplomové práce (Příloha 1).

Většina vyprodukované vysokopecní strusky se používá jako přísada do portlandských cementů. Vysokopecní struska se přidává z několika důvodů. Hlavní důvody jsou snížení ekonomické náročnosti, latentní hydraulická struska a také nutnost použití určitého množství jemných podílů. Použití vysokopecní strusky také zmenšuje množství uhlíkové stopy výsledného cementu.

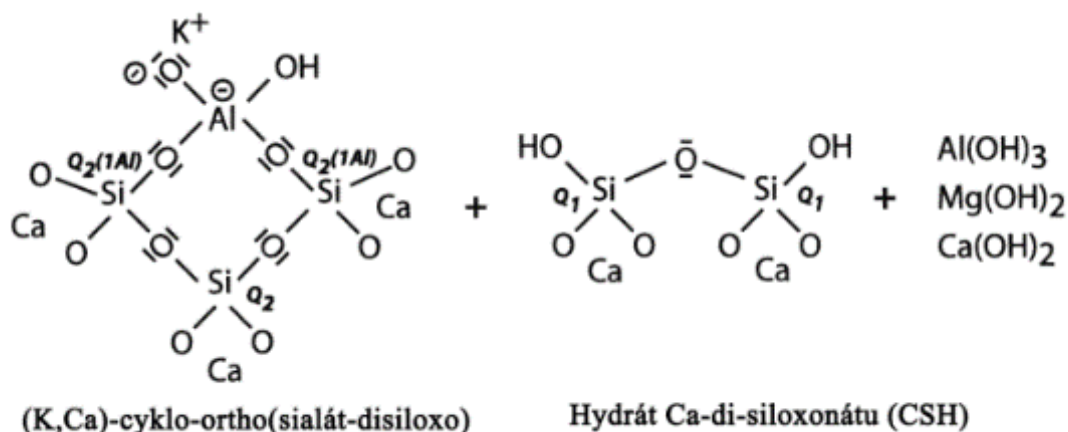
5 PRINCIP ALKALICKÉ AKTIVACE STRUSKY

Aktivace strusky podle prof. Davidovitse probíhá ve dvou krocích. Zásaditý aktivátor, který se se struskou smíchá, poruší vazby Si-O, Al-O a Ca-O. Do tohoto roztoku jsou poté uvolněny hydratované molekuly (K, Ca) – ortho-sialátu a zároveň hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$. Po této reakci vzniká Ca-di-siloxonát (C-S-H gel) a $\text{Mg}(\text{OH})_2$. [10] (Obrázek 3)



Obrázek 3 - Produkty vzniklé při prvním kroku alkalické aktivace vysokopecní strusky [10]

Během druhého kroku dochází ke kondenzaci vzniklých ortho-sialátu a C-S-H gelů. Dojde tak ke vzniku čtvercových ortho-(sialát-disiloxo), které se nazývají C_3AS_3 . C-S-H gel je hlavním produktem této reakce. [10] (Obrázek 4)



Obrázek 4 - Produkty alkalické aktivované strusky [10]

Alkalickou aktivací strusky vzniklý C-S-H gel je velmi podobný C-S-H gelu, který vzniká v portlandských cementech. Rozdílností je možná přítomnost můstkového hliníku mezi dvěma dimery C-S-H gelu, čímž je výsledný C-S-H gel.

Výsledky hydratačního procesu jsou závislé na složení strusky a na druhu použitého aktivátoru.

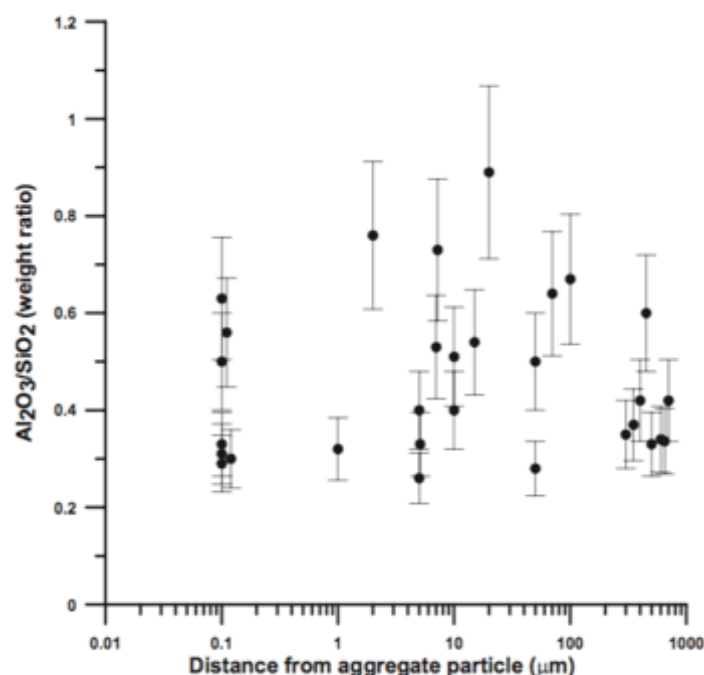
6 MEZISLOŽKOVÁ PŘECHODOVÁ ZÓNA

Interfacial transition zone (dále ITZ), volně přeložené jako mezisložková přechodová zóna, je oblast pojiva v těsné blízkosti zrna kameniva. ITZ se u struskového a cementového pojiva v mnohém liší.

Cementová ITZ je charakteristická vyšším obsahem portlanditu (CH) a také nižší koncentrací C-S-H gelu [18]. Pro cementovou ITZ je také typická vyšší pórovitost. Vyšší pórovitost umožňuje snazší penetraci nežádoucích látek, jako například chloridů. Pro ITZ u cementových pojiv je typická trhлина na rozhraní kamenivo – pojivo. Tato trhлина výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti a právě proto je ITZ u cementových pojiv označována jako nejslabší část. Kvůli těmto důvodům je tendence zlepšit chemické složení a především mikrostrukturu ITZ cementu, čímž by se mohla vylepšit pevnost a odolnost betonů na cementové bázi. [12]

U struskových pojiv doposud nebylo věnováno tolik pozornosti vlivu pojiva na kamenivo. U struskových pojiv nebyl zjištěn větší rozdíl v chemickém složení nebo mikrostruktury v blízkosti zrna kameniva. [11] Díky tomu se ve struskových pojivech

nevyskytuje výrazně slabší oblast, což je dělá mechanicky odolnější. Nižší pórovitost zvyšuje odolnost vůči nežádoucím látkám. Naopak klíčový je obsah solí ve směsi. Při vyšším obsahu solí, například KCl, je výsledná pevnost nižší. [31]



Obrázek 5 - Mění se poměr $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ při změně vzdálenosti od zrna kameniva [31]

Obrázek 5 znázorňuje měnící se poměr $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. Z obrázku je zřejmá vysoká proměnlivost sledovaných oxidů.

7 Alkalické aktivátory

Sodné vodní sklo je čirá, slabě zakalená nebo slabě zabarvená viskózní kapalina, která je neomezeně mísitelná s vodou.

Vodní sklo se využívá především při výrobě alkalických křemičitanů, při výrobě pracích prostředků, k odmašťování, jako složka protipožárních materiálů, k ochraně dřeva při hnilobě, proti termitům, ohni, vodě a v neposlední řadě také jako přídavek do žáruvzdorných šamotových směsí.

Sodné vodní sklo bylo upraveno 50 % roztokem hydroxidem sodným na silikátový modul 2. Úprava vodního skla probíhala podle diplomové práce Ing. Michaely Topinkové. [27]

8 Portlandský cement

Cement je jemně mletá anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Při smíchání cementu s vodou vznikne dobře zpracovatelná hmota, která tuhne i tvrdne na vzduchu i pod vodou. Cement je jedna za základních složek betonu a malt. Ročně se ho vyrobí více než 2 milióny tun, výroba cementu nechává obrovskou uhlíkovou stopu.

Základní suroviny pro výrobu portlandského cementu je směs CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a MgO . Tato směs se pálí v rotační peci, kdy se teplota v průběhu pálení mění. Směs se v průběhu pálení spéká do hrudek a vzniká slínek, který se poté najemno mele. [6] Tabulka 3 znázorňuje složení portlandského cementu. [26]

Název složky	Hmotnostní podíl %
Trialkcium silikát C_3S	45–65%
Dikalcium silikát C_2S	15–30%
Trialkcium aluminát C_3A	1–8%
Tetralcium aluminoforit C_4AF	8–15%
Sádra	1–3%

Tabulka 3 - Složení portlandského cementu [26]

9 Použité kamenivo

V rámci diplomové práce bylo využito 5 druhů kameniva. Především pak lokální horniny, které se běžně využívají pro výrobu betonu. Konkrétně amfibol, žula, krystalický vápenec. Byl použit také stavební recyklát.

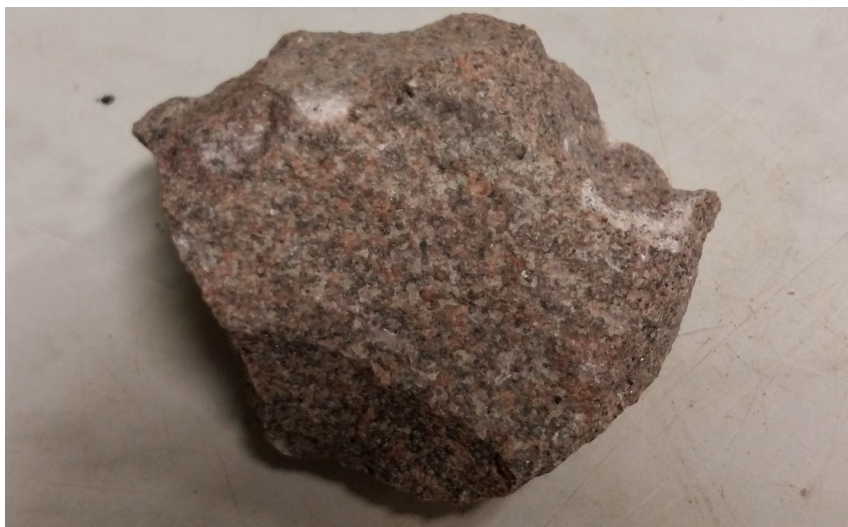
Na všech těchto vzorcích byla provedena rentgenová prášková difrakce, která stanovuje fázové složení kameniva. Veškeré tyto výstupy jsou v příloze této práce.

9.1 Žula

Hlubinná vyvřelá hornina známá jako žula, nebo také jako granit, označuje všechny hlubinné horniny, které obsahují velké množství draselných živců, křemene a kyselých plagioklasů. Barevnost žuly výrazně ovlivňují složky v ní. Žula může být šedá s nádechem zelené nebo modré, některé mohou být zbarveny do červena. Žuly jsou především hrubozrnné s všesměrnou texturou a granitickou strukturou.

Ložiska této horniny je možné nalézt na území České republiky a to na Šumavě, v Železných horách, v Jeseníkách a na mnoha dalších menších lokalitách. Ve světě jsou pak významná ložiska v Rakousku, Německu a ve skandinávských zemích. [7]

Pro experimentální část byla vybrána žula pocházející z dolu Litice nad Orlicí. Tato žula je specifická svou světle šedou barvou a lehkým červeným odstínem, velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a pravidelnou zrnitostí. Litická žula obsahuje 36 % alkalických živců (většinou K-živce), 31 % křemene a plagioklasů. Albit a aolinit pak tvoří jen 3 % z celkového podílu minerálů. [7]



Obrázek 6– Litická žula[7]

9.2 Stavební recyklát s vysokým obsahem strusky

Stavební recyklát je druhotný materiál výsledkem demoličních prací. Recyklát je poté nadrcen na další použití. Výsledné kamenivo nemá nebezpečné vlastnosti a postupem času u něj nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám. Kvůli dobrým vlastnostem je stavební recyklát běžně využíván jako recyklované kamenivo, do násypů nebo jako podloží vozovek. Běžnou součástí recykláty jsou kusy betonu, tašek, cihel, sádra. [23]

Při použití recyklátu je nutné počítat s horšími vlastnostmi než u přírodního kameniva. Snižuje se pevnost v tlaku a modul pružnosti. Zvyšuje se smršťování a výsledné dotvarování. Před použitím většího množství recyklátu se doporučuje provést zkoušky na vlastnosti kameniva. [23]

9.3 Amfibolit

Regionálně metamorfovaná hornina, známá jako amfibolit se vyznačuje střední až hrubou velikostí zrna. Amfiboly a plagioklasy jsou hlavní složkou této horniny. Zbarvení amfibolitu je z převážné části černé až zelené, případně černé s nádechem zelené. Minerály, které jsou v této hornině obsaženy, tvoří živce, granáty a biotity. Amfibolit je tvořený všesměrnou až páskovanou texturou a nematoblastickou strukturou. [32]

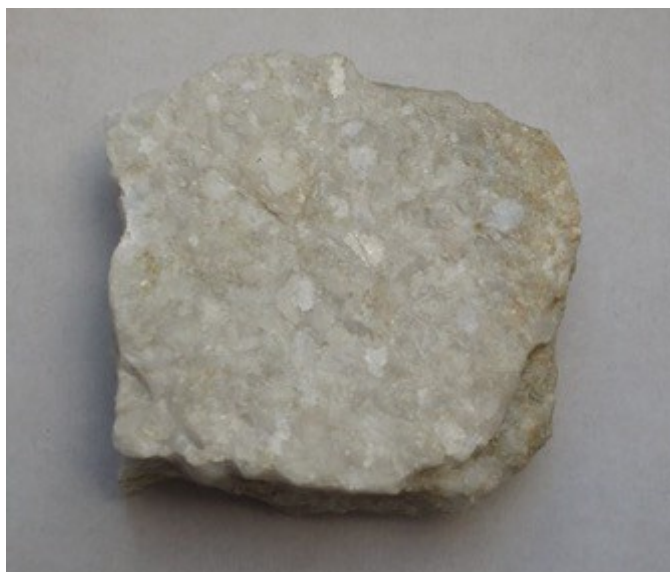
Amfibolit použitý v experimentální části pochází z dolu Želešice. Amfibolit ze Želešic je zelenošedý, z velké části převážně jemnozrný. Textura této horniny je výrazně rovnoběžná, místy však všesměrná.

9.4 Krystalický vápenec

Krystalický vápenec, také mramor, je bílá hornina, která obsahuje až 95 % kalcitu. Barva vápence závisí na barvě příměsí. Lze nalézt mramor s barvou do černa (kvůli obsahu granitu), červena (kvůli obsahu hematitu) a do hněda (kvůli obsahu olivínu). [22]

Mramor vzniká metamorfózou vápence, proto je možné v něm najít schránky živočichů. Textura mramoru je páskovaná nebo masivní, struktura homeoblastická až hranoblastická.

Standardním mramorem je tzv. kararský mramor, který je sněhobílý. Své jméno dostal podle místa, ve kterém se těží a to podle italského města Carrara. V České republice je možné mramor nalézt v Českém Štemberku, Nedvědicích nebo Cetechovicích. [22]



Obrázek 7 - Krystalický vápenec [22]

9.5 Travertin

Travertin je chemicky usazená hornina, která je svým složením velmi podobná vápenci. Z velké části je tvořena drobnými krystalky čistého kalcitu, které na sebe navazují další částičky. Tato hornina je většinou znečištěna částičky jílu a křemene. Typická je pórovitá struktura a vrstevnatá textura. Je především využíván jako dekorační kámen.

Tuto horninu je možné nalézt v České republice a také na Slovensku. Ve světě pak v Itálii, Německu, USA a Turecku. [22]



Obrázek 8– Travertin [22]

10 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zaměřuje především na výrobu a zkoušení vzorků. Zjištěny byly také základní vlastnosti kameniva, které bylo použito na výrobu vzorků. Pozornost byla také věnovaná mikroskopii, byla provedena rentgenová difrakce a skenování elektronovým mikroskopem.

Pro praktickou část bylo zvoleno 5 druhů kameniva. Z každého druhu kameniva bylo uděláno 6 vzorků, u nichž byl použit jako pojivo cement a 6, u kterých byla jako pojivo použita vysokopecní aktivovaná struska. Celkově bylo vyrobeno 60 vzorků. Všechny trámečky byly po 28 dnech zkoušeny na pevnost v tlaku a na pevnost v tahu za ohybu.

11 Příprava vzorků

Příprava dílčích surovin a výroba trámeček probíhala v laboratoři stavebních hmot na fakultě stavební VŠB-TUO Ostrava.

11.1 Příprava kameniva

Poté co byly všechny vybrané horniny dostupné musely být upraveny na požadovanou frakci. Podle normy pro výrobu cementových trámeček ČSN EN 196-1 mají být zkoušené vzorky namíchány z frakcí 0,25-0,5; 0,5-1 a 1-2. Mletí na požadovanou frakci probíhalo na drtiči, který je ve vybavení laboratoře stavebních hmot (Obrázek 9). Na výrobu trojformy je potřeba 0,5 kg kameniva z každé z požadovaných frakcí. To znamená, že byla potřeba celkem 2,0 kg kameniva z každé frakce z každé horniny.



Obrázek 9–Drtič firmy Retsch, na kterém probíhalo mletí

11.2 Záměsová voda

Do všech směsí byl použita pitná voda, která vyhovuje normě ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu. [1] Záměsová voda nebyla dále zkoušena.

11.3 Vysokopecní struska

Do všech záměsí byla použita jemně mletá vysokopecní struska SMŠ 400 od společnosti Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. Struska je ve shodě PN 72 2090, systém řízení jakosti je shodě s normou ČSN EN ISO 9001 : 2009 (Příloha 1).

11.4 Aktivátor

Vysokopecní struska byla aktivovaná pomocí vodního skla, které bylo upraveno 50% hydroxidem sodným. Silikátový modul byl roven 2,0. Úprava vodního skla byla stejná jako v případě diplomové práce od Ing. Michaely Topinkové. [27]

Vlastnosti sodného vodního skla 36/38 EuroŠarm

MS = 3,34

Hustota = 1335 kg.m³

Obsah SiO₂ = 24,29 %

Obsah Na₂O = 7,5 %

Obsah sušiny = 44%

11.5 Příprava vzorků na zkoušení pevnosti

Na zkoušení alkalicky aktivovaných materiálů v současné době neexistuje norma. Pro zkoušení vzorků na pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu byla použita norma ČSN EN 196-1 [4].

Z každé horniny bylo vyrobeno 6 trámečků z cementu a 6 trámečků, u kterých bylo použita mletá vysokopecní struska. Základem každé směsi bylo použito 450 g od každé frakce kameniva. V případě směsi s cementem bylo použito 450 g cementu, vodní součinitel 0,5, tudíž 225 ml vody. Pro směs s vysokopecní struskou bylo zamícháno 450 g mleté vysokopecní strusky, 100 ml vody, 116 ml sodného vodního skla a 14 ml hydroxidu vápenatého.

Směs byla namíchána v míchačce od firmy Beton System s.r.o. (Obrázek 10). Program míchačky byl zvolen tak, aby odpovídal normě. Před použitím byla míchačky navlhčena, kamenivo bylo dávkované ze zásobovače míchačky. Pozornost byla věnovaná kvalitě zamíchání směsi.



Obrázek 10 - Michačky firmy Beton.Systém s. r. o.

Směsi byly po zamíchání vlitý do forem, které byly předem vymazány olejem pro snazší odformování. Formy byly plněny ve dvou vrstvách, každá z vrstev byla vibrována. Alkalicky aktivované vzorky byly zabaleny do průhledné fólie, aby bylo zachováno alkalické prostředí. Vzorky s cementem byly vložena do vlhkého prostředí.

12 Metodika zkoušení

12.1 Zkoušení základních vlastností kameniva

Zkouška základních vlastností kameniva probíhala podle normy ČSN EN 1096-6. [2] Zjišťované vlastnosti jsou objemová hmotnost a nasákavost.

Podstata zkoušky: Objemová hmotnost i nasákavost se zjišťuje pomocí pyknometrické zkoušky. Zkoušení probíhalo na kamenivu frakce 0,063/4 mm.

Důležité faktory: Zkoušené kamenivo musí být promyto, aby byly odstraněny drobnější částice. Navážka pro kameniva 0,063/4 mm nesmí být menší než 300 g.

Postup zkoušení: Promytá zkušební navážka se ponoří do pyknometru a jemně se odstraní vzduchové bubliny. Kamenivo musí být namočeno minimálně 24 hodin, teplota se během zkoušení musí být $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Po skončení nasakování se znovu odstraní vzduchové

bublíny. Pyknometr se přeplní, osuší se z vnější strany a zváží M_2 . Poté se voda vylíje a pyknometr se vyprázdní na ták. Pyknometr se znovu zcela naplní vodou, osuší a zváží se M_3 .

Nasáklá navážka se rovnoměrně rozprostře na ták a povrchově osuší pomocí horkého vzduchu. Kamenivo se pravidelně promíchává, aby bylo osušení stejnoměrné. Kamenivo se suší tak dlouho, dokud na sobě jednotlivá zrnka neulpívají. Nasáklá a povrchově osušená navážka se zváží M_1 . Kamenivo se suší v sušárně při $110 \pm 5^\circ\text{C}$ dokud není jeho hmotnost konstantní. Před vážením se kamenivo ochladí na teplotu okolí a zváží se M_4 . Poté se vypočte objemová hmotnost podle (Vzorec 2) a nasákavost podle (Vzorec 3).



Obrázek 11 - Vzorky kameniva před vložením do sušárny

Objemová hmotnost se vypočte ze vztahu:

$$\rho_{RD} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (\text{Vzorec 2})$$

Nasákavost se vypočte dle vztahu:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} [kg/m^3] \quad (\text{Vzorec 3})$$

Kde: ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [kg/m^3]
 M_1 hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva [g]
 M_2 hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek kameniva a vody [g]
 M_3 hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou [g]
 M_4 hmotnost vysušené zkušební navážky [g]

12.2 Zkoušení fileru kameniva

Zkoušení fileru probíhala podle normy ČSN EN 1096-7. [3] Výsledkem je měrná hmotnost kameniva.

Podstata zkoušky: Měrná hmotnost fileru se zjišťuje pomocí pyknometrické zkoušky. Filerem se rozumí částice, které propadly sítím o velikosti oka 0,125 mm.

Důležité faktory: Je důležité, aby byla zkouška provedena přesně podle postupu daný normou. Zkoušení probíhá na malém vzorku, všechny hmotnosti jsou váženy na váze s přesností 0,001 g. Zkušební navážka musí být vysušená, vysušení probíhá při $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Vzorky: Celkem bylo odzkoušeno 5 druhů kameniva. Na jednu zkoušku se použije 10 ± 1 g. Celková navážka musí mít minimálně 50 g.

Postup zkoušení: Zváží se čistý a suchý pyknometr včetně zátky m_0 . Do pyknometru se nasype navážka 10 ± 1 g fileru a poté se celý pyknometr zváží (vč. zátky) m_1 . Poté se přidá tolik kapaliny, aby byl celý vzorek ponořen. Pyknometr se vloží do exikátoru, vnese se podtlak, a nechá se v něm aspoň 30 minut. Po doplnění vodou se pyknometr vloží do vodní lázně tak, aby vyčníval 2 – 3 mm nad hladinu vody. Po 60 minutách se pyknometr zazátkuje.

Pyknometr se osuší. Při manipulaci se pyknometr mírně zahřívá, proto je třeba zkrátit manipulační čas na minimum. Zcela plný pyknometr s navážkou se zváží m_2 . Měrná hmotnost se vypočte dle (Vzorec 4).



Obrázek 12 - Připravené vzorky před vložením do exikátoru

Měrná hmotnost se počte dle vztahu:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}} [kg / m^3] \quad (\text{Vzorec 4})$$

Kde: m_0 hmotnost prázdného pyknometru se zátkou [g]
 m_1 hmotnost pyknometru se zkušební navážkou [g]
 m_2 hmotnost pyknometru se zkušební navážkou, zalitá kapalinou [g]
 V objem pyknometru [ml]
 ρ_l hustota kapaliny při teplotě 25° C [Kg/m³]

12.3 Zkoušení trámečků na pevnost v tahu za ohybu

Zkouška na pevnost v tahu za ohybu probíhala dle normy ČSN EN 196-1 [4].

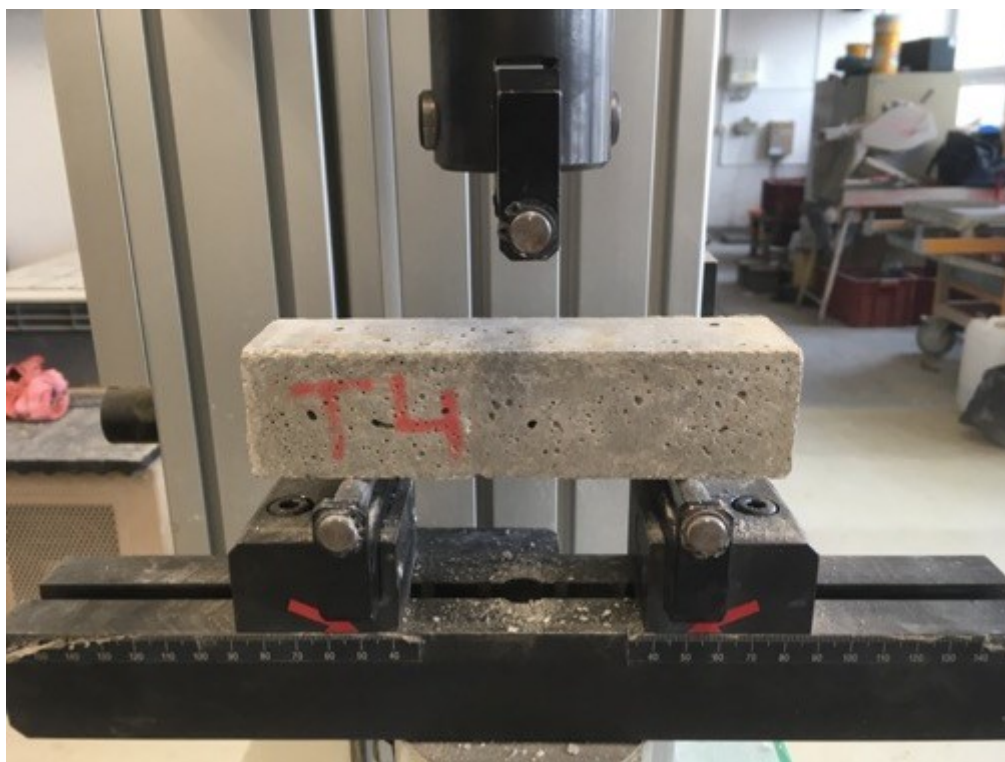
Podstata zkoušky: Pevnost v tahu za ohybu malty se zjišťuje pomocí třibodového zatěžování dokud nedojde k porušení tělesa. Trámečky jsou velikosti 40x40x160 mm. Podpory jsou od sebe vzdáleny 100 mm.

Důležité faktory: Je důležité, aby vzorky byly připraveny přesně podle daného postupu. Pozornost byla věnovaná hlavně kvalitě zamíchání a vibrování. Vzorky poté byly uloženy do vhodného prostředí. Při odformování může dojít k poškození vzorků, proto byly formy předem vymazány olejem. Před zkoušením byly trámečky očištěny od přebytečného materiálu.

Vzorky: Celkem bylo namícháno 60 trámečků velikosti 40x40x160 mm.

Postup zkoušení: Vzorky byly zkoušeny na stroji, který je ve vybavení laboratoře stavebních hmot s parametry, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 196-1 [4]. Zkoušení všech vzorků probíhalo po 28 dnech, poté co byly vyjmuty z prostředí, ve kterém tvrdly.

Trámeček se uloží do zkušebního stroje kolmo na směr plnění na válcové podpory vzdáleny 100 mm od sebe. Horní váleček působí do poloviny trámečku. Zatěžování je rovnoměrné s rychlostí 10-50 N/s, tak aby byl vzorek porušen v intervalu 30-90 s od začátku zatěžování. Síla F_f je zaznamenána v N při poruše (zlomení) tělesa. Způsob uložení do stroje znázorňuje Obrázek 13. Z dosažených hodnot se vypočte pevnost tahu ohybem dle (Vzorec 5).



Obrázek 13 - Zkoušení vzorků na pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu se vypočítá ze vztahu:

$$R_f = \frac{1,5F_f * l}{b^3} [MPa] \quad (\text{Vzorec 5})$$

Kde: F_f vynaložené zatížení při zlomení [N]

l vzdálenost mezi podporami [mm]

b strana čtvercového průřezu [mm]

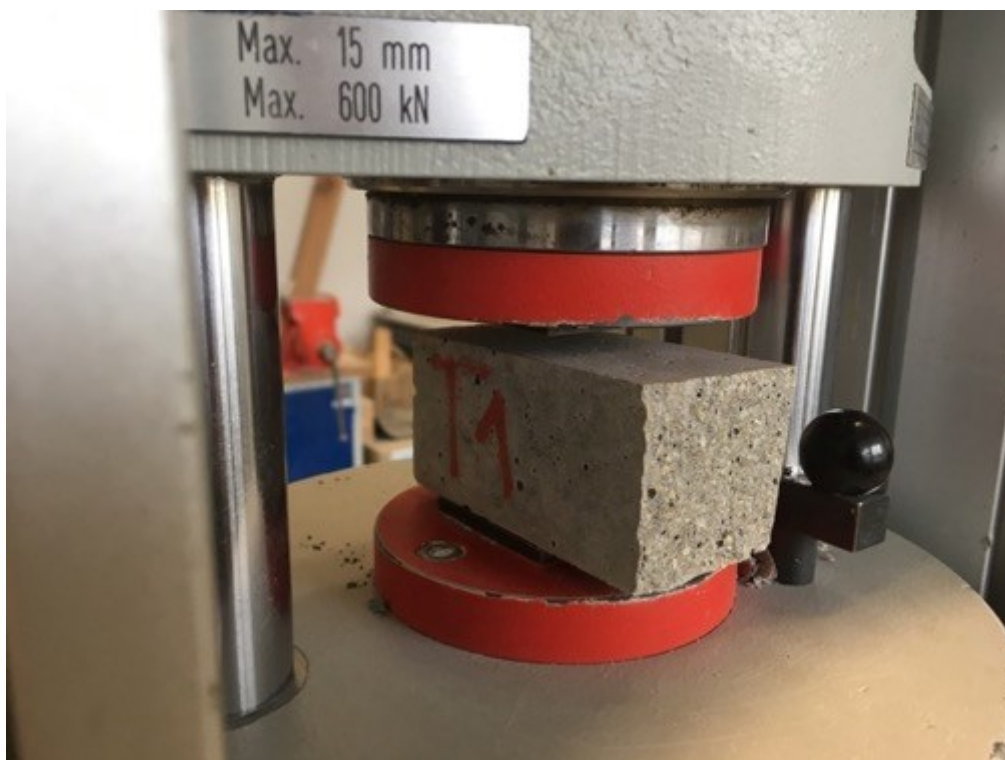
12.4 Zkoušení na pevnost v tlaku

Zkouška na pevnost v tlaku probíhala dle normy ČSN EN ČSN EN 196-1 [2].

Podstata zkoušky: Pevnost v tlaku se zjišťuje na čtvercové ploše 40x40 mm.

Vzorky: Pro zkoušku v tlaku byly použity poloviny trámečků, které vznikly po zkoušení v tahu za ohybu.

Postup zkoušení: Vzorky se vkládají do zkušebního stroje kolmo na směr plnění, vkládají se tak, aby konce přechuhovaly minimálně o $16 \pm 0,1$ mm. Rychlost zatěžování se s délkou zkoušení zvyšuje v intervalu 50-500N/s, tak aby byl vzorek porušen do 30-90 s. Je zaznamenaná maximální hodnota zatížení při poškození vzorku. Obrázek 14 znázorňuje uložení vzorků do lisu. Pevnost v tlaku se vypočte podle vzorce (Vzorec 6).



Obrázek 14 - Zkoušení vzorků na pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} [MPa] \quad (\text{Vzorec 6})$$

Kde: F_c zatížení při porušení vzorku[N]

1600 zatěžovací plocha (40x40 mm) [mm²]

13 KVANTITATIVNÍ MINERALOGICKÁ ANALÝZA

Strukturní analýza, konkrétně rentgenová prášková difrakce, byla dělána pro zjištění mineralogického složení hornin.

13.1 Příprava vzorků

Rentgenová prášková difrakce byla provedena na vzorcích kameniva. Z každého horniny bylo odebráno minimálně 10 g vzorku drobného kameniva. Kamenivo poté bylo pomleto pomocí mikromletí na prášek se zrnitost pod 5 µm.

13.2 Podmínky zkoušení

Měření probíhalo na stroji Bruker-AXD D8 Advance s pozičně citlivým detektorem LynxEyE.



Obrázek 15–Rentgenový difraktometr Bruker-AXD D8 Advance

Za podmínek:

- použita byla kobaltové katoda s Fe filtrem
- napětí měření bylo 40 kV
- proud 40 mA
- měření probíhalo pomocí kroků s krokem $0,015^\circ 2\theta$, čas kroku 2 s

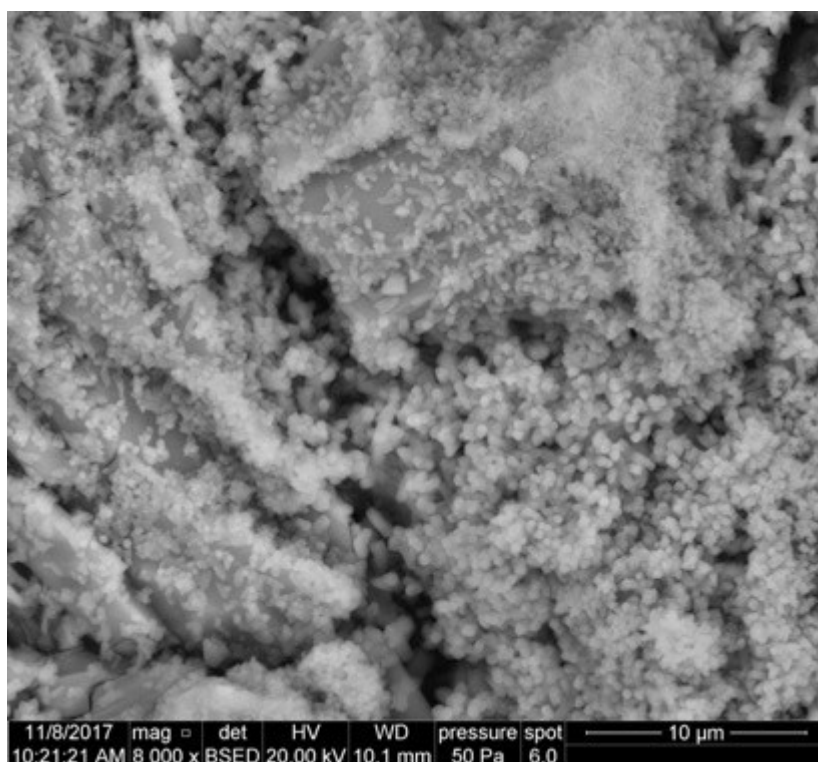
Výsledky byly digitálně zpracovány. Pro měření i pro vyhodnocení byly použity programy BrukerDiffacSuite.

14 Mikroskopická analýza

Hlavní částí této diplomové práce je mikroskopická analýza. Příprava vzorků a samotné analýzy byly provedeny na vybavení Hornicko – geologické fakulty Vysoké školy báňské.

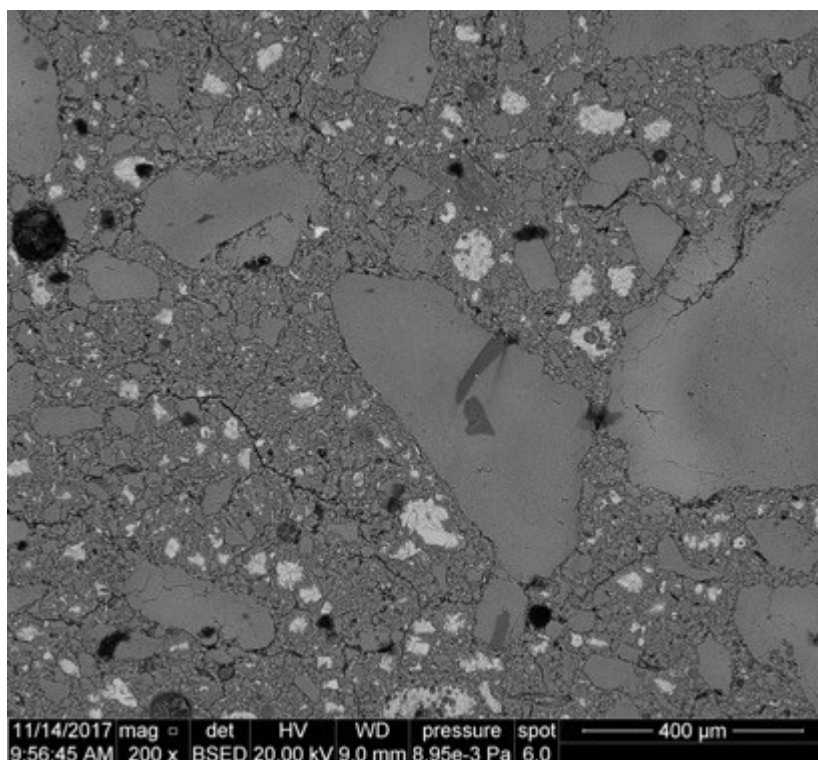
14.1 Příprava vzorků na elektronový mikroskop

Hlavním výstupem skenování pomocí elektronového mikroskopu, je měnící se chemické složení pojiva v blízkosti zrna kameniva a právě tomu byla potřeba vzorky připravit. Vzorky, což jsou vyrobené trámečky, nebyly zkoušeny na pevnost, proto byly rozřezány a omyty vodou. První zkušební skenování probíhalo na povrchově neupraveném vzorku amfibolitu s cementem. Obrázek 16 je výsledkem, na obrázku nelze jasně definovat přechod mezi zrnem kameniva a pojivem, proto se musí vzorky před dalším skenováním upravit.



Obrázek 16 - Skenování povrchově neupraveného vzorku, zvětšení 8000x

Druhý vzorek žuly s cementem byl vyleštěn a pokovil se tenkou vrstvou chromu (30 μm), aby se vzorek při zkoušení nenabíjel. Vzorek byl velmi pórovitý, proto nebylo možné dosáhnout souvislé vrstvy na povrchu vzorku. Následně nebylo možné dosáhnout vysokého vakua ve vakuové komoře skenovacího elektronového mikroskopu, proto byl obrázek pořízen za lehkého vakua, což snížilo jeho ostrost a přesnost (Obrázek 17).



Obrázek 17 - Výsledek skenování broušeného a pokovaného vzorku

Pro získání souvislé vrstvy pokovování bylo nutné vzorky zmenšit a vyleštit. Z každého vzorku se pomocí diamantové pily vyřízl menší vzorek o velikostech přibližně 1 x 1 cm. Poté byl zhotoven nábrus. Broušení probíhalo na 2 brusných papírech, za dotace vody. První brusný papír měl zrnitost 220, druhý 1000.



Obrázek 18 - Kotoučová bruska na kameny

Leštění bylo prováděno na kulečnickovém plátně, což je velmi jemný leštící papír. Pro snížení tření byla použita pasta s obsahem oxidu hlinitého. Pasta se poté musela vymýt.



Obrázek 19 - kotoučová bruska s leštícím kotoučem



Obrázek 20 - Nabroušené a vyleštěné vzorky



Obrázek 21 - Detail vyleštěného vzorku směsi s aktivovanou struskou a amfibolitem

Obrázek 20 porovnává nabroušené vzorky s původními. Takto připravené vzorky jsou připraveny k pokovování. Obrázek 21 zobrazuje detail vyleštěného vzorku amfibolitu s aktivovanou struskou.

14.2 Podmínky měření

Pro zkoušení byl použit autoemisní elektronový mikroskop FEI Quanta-650 s detektorem difrakce zpětně odražených elektronů EBSD.

Podmínky měření:

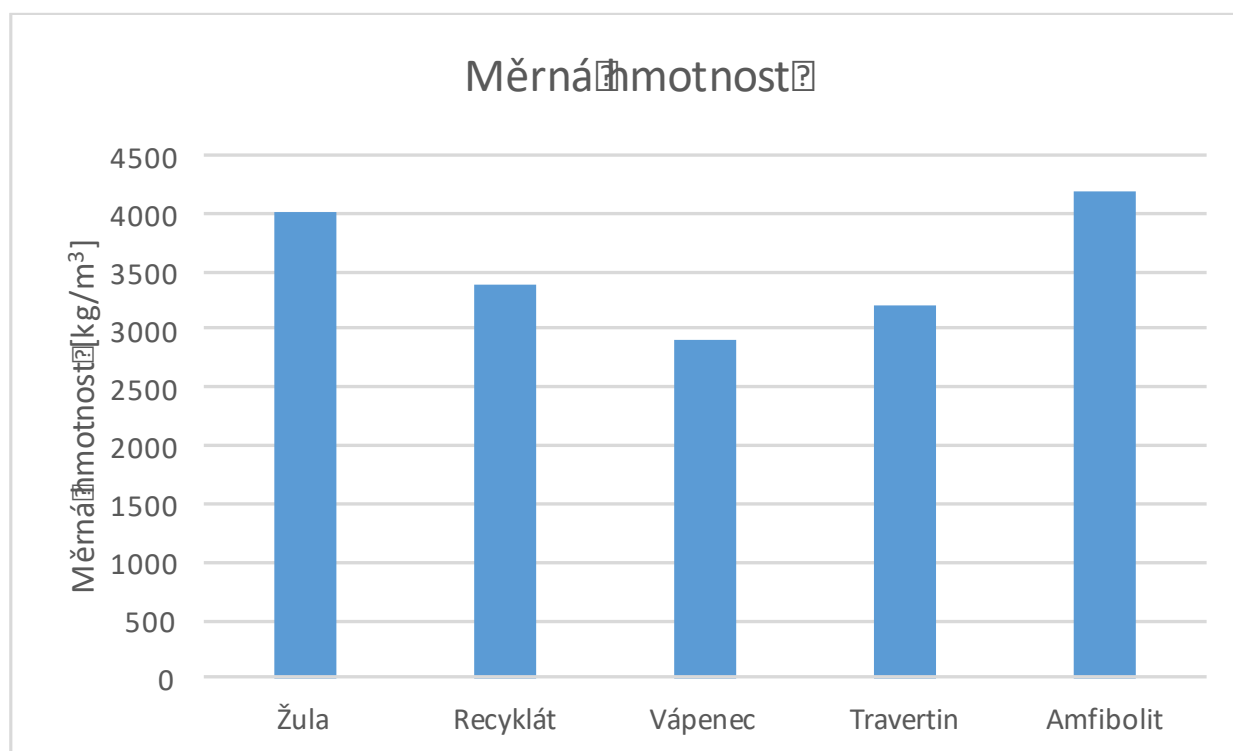
- napětí 20kV
- proud 8 – 10 nA
- průměr svazku 5,5 mm
- snížené vakuum v komoře s tlakem 20 Pa

15 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK A MĚŘENÍ

15.1 Výsledky měrné hmotnosti fileru kameniva

Název vzorku	m_0 [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	Měrná hmotnost [kg/m^3]
Žula	23,901	33,903	81,400	4000
Recyklát	25,342	35,351	82,410	3400
Vápenec	24,160	34,213	80,766	2920
Travertin	24,434	34,462	81,419	3200
Amfibolit	24,650	34,662	82,276	4200

Tabulka 4 - výsledky měrné hmotnosti fileru kameniva



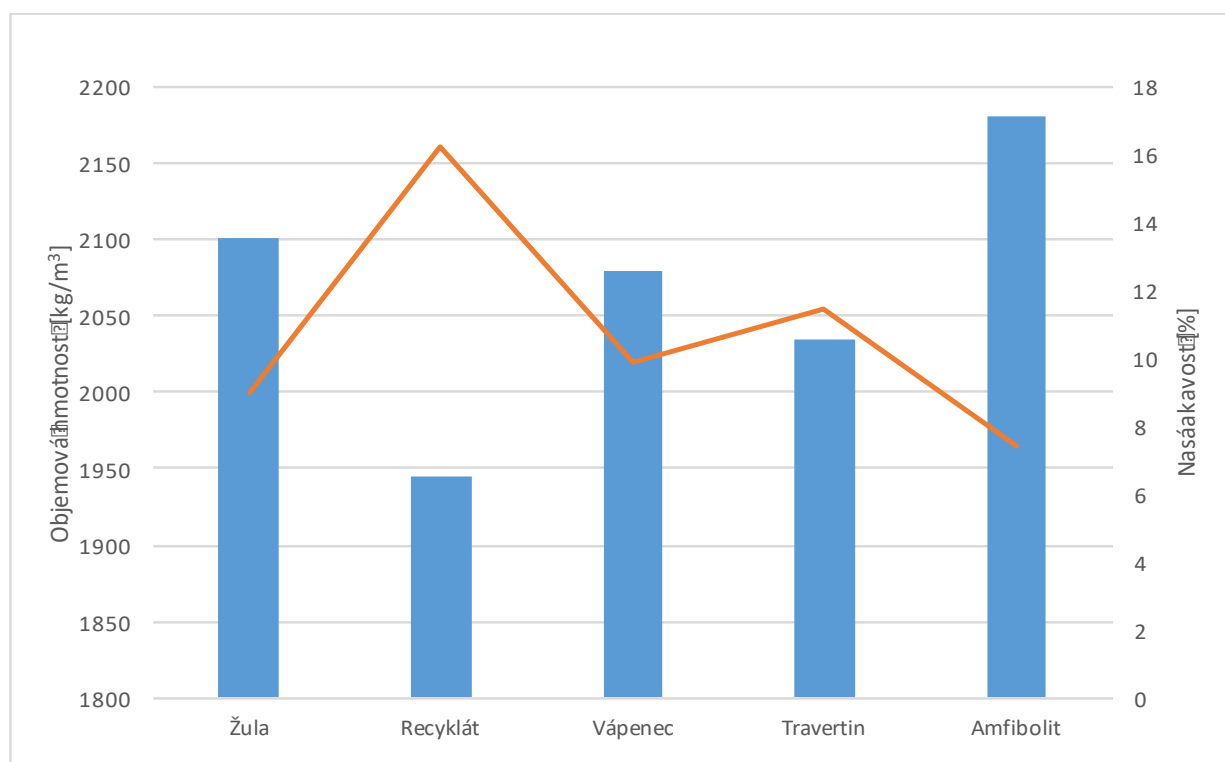
Graf 1 - Porovnání měrné hmotnosti kameniva

Tabulka 4 znázorňuje výsledky měrných hmotností fileru kameniva. Výsledky jsou zaokrouhleny na nejbližších 10 kg/m^3 . Výrazně nejnižší měrnou hmotnost měl vápenec, naopak nejvyšší amfibolit.

15.2 Výsledky základních vlastností kameniva

Ozn. vzorku	m ₁ [kg]	m ₂ [kg]	m ₃ [kg]	m ₄ [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]
Žula	0,432	2,093	1,850	0,396	2100	9,0
Recyklát	0,334	2,005	1,819	0,287	1945	16,2
Vápenec	0,461	2,084	1,825	0,419	2080	9,9
Travertin	0,375	2,015	1,806	0,336	2035	11,5
Amfibolit	0,320	2,021	1,838	0,298	2180	7,4

Tabulka 5 - výsledky základních vlastností kameniva



Graf 2 - Porovnání objemové hmotnosti a nasákavosti

Výsledky objemové hmotnosti jsou zaokrouhlovány na nejbližší 10 kg/m³, nasákavost se zaokrouhluje na jedno desetinné číslo. Výsledky znázorňuje Tabulka 5, nejvyšší objemové hmotnosti a nejnižší nasákavosti dosáhl amfibolit. Naopak nejnižší objemovou hmotnost a výrazně nejvyšší nasákavost měl recyklát.

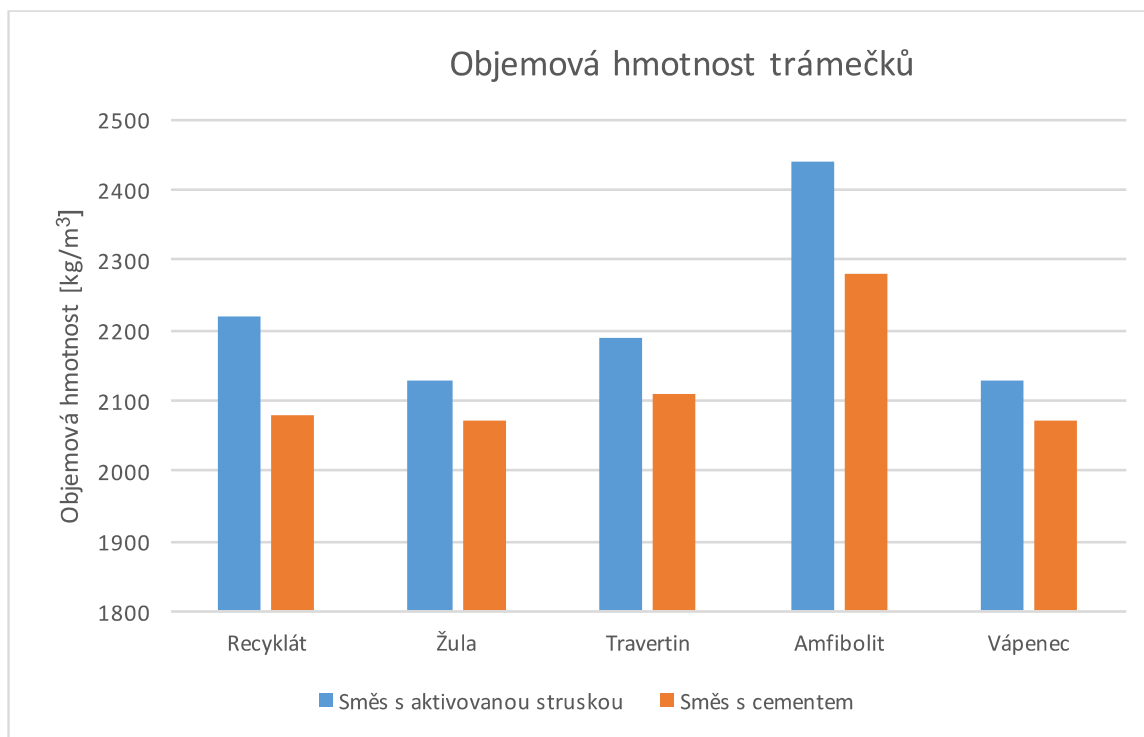
15.3 Rozměry a objemová hmotnost

Ozn. vzorku	d ₁	d ₂ [mm]	L [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
R1	38,60	40,09	160,55	0,544	2190	2220
R2	39,52	40,22	160,35	0,555	2178	
R3	39,53	40,05	160,44	0,551	2167	
R4	40,24	39,18	161,25	0,571	2244	
R5	39,00	39,18	161,24	0,577	2342	
Ž1	40,77	40,12	160,38	0,557	2121	2130
Ž2	39,49	40,06	160,57	0,539	2122	
Ž3	40,08	40,07	160,61	0,549	2128	
Ž4	39,53	40,13	159,60	0,545	2153	
Ž5	39,96	41,09	159,64	0,561	2140	
T1	39,97	40,50	159,97	0,576	2224	2190
T2	38,78	39,95	159,95	0,559	2256	
T3	40,12	40,45	160,39	0,560	2150	
T4	40,22	40,06	159,61	0,562	2185	
T5	41,84	40,12	160,61	0,573	2123	
A1	39,98	39,49	159,83	0,620	2457	2440
A2	39,91	39,98	160,59	0,620	2420	
A3	40,07	39,77	159,25	0,625	2461	
A4	39,89	38,77	159,60	0,610	2469	
A5	40,11	40,32	160,14	0,626	2415	
V1	41,39	40,63	159,63	0,571	2127	2130
V2	40,79	40,73	159,95	0,564	2121	
V3	40,44	40,91	159,36	0,561	2128	
V4	39,99	40,04	160,33	0,553	2154	
V5	40,05	39,97	160,57	0,540	2101	

Tabulka 6 - Rozměry a objemová hmotnost vzorků se struskou

Ozn. vzorku	d ₁	d ₂ [mm]	L [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
R1	40,70	39,63	162,57	0,545	2078	2080
R2	41,05	40,33	162,09	0,551	2055	
R3	40,04	39,97	161,37	0,542	2101	
R4	40,34	39,53	161,47	0,528	2051	
R5	40,30	39,47	161,54	0,540	2102	
Ž1	40,68	40,49	161,25	0,550	2073	2070
Ž2	40,18	39,57	161,33	0,543	2119	
Ž3	40,46	40,26	161,49	0,530	2018	
Ž4	41,56	39,12	159,83	0,538	2072	
Ž5	41,20	39,97	158,19	0,538	2067	
T1	41,26	40,20	160,67	0,557	2090	2110
T2	40,08	40,28	160,55	0,518	1998	
T3	40,02	38,98	161,16	0,520	2070	
T4	40,48	39,18	161,37	0,562	2196	
T5	40,23	39,27	161,57	0,554	2170	
A1	40,92	40,18	161,14	0,599	2261	2280
A2	40,13	40,03	160,58	0,590	2287	
A3	40,15	39,83	160,88	0,602	2340	
A4	40,09	41,76	161,21	0,595	2205	
A5	40,13	39,47	161,08	0,592	2320	
V1	39,81	41,50	162,12	0,532	1986	2070
V2	40,16	40,04	160,24	0,528	2049	
V3	40,06	41,92	162,59	0,543	1989	
V4	40,18	39,46	160,37	0,555	2183	
V5	40,20	39,16	162,25	0,542	2122	

Tabulka 7 - Rozměry a objemové hmotnosti vzorků s cementem



Graf 3 - Porovnání objemové hmotnosti trámečků

Výsledky objemových hmotností vzorků se struskou (Tabulka 6) a s cementem (Tabulka 7) korelují, vzorky se struskou mají větší objemovou hmotnost o 3-7 %, což je způsobeno vyšší objemovou hmotností strusky (Graf 3).

15.4 Výsledky mechanických vlastností

Ozn. vzorku	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
R1	2,9	7,0	69,5	43,4	65,3	40,8
R2	2,6	6,1	82,4	51,5	56,6	35,4
R3	2,4	5,7	67,6	42,3	75,5	47,2
R4	2,9	7,0	68,2	42,6	73,4	45,9
R5	3,2	8,0	76,6	47,9	78,5	49,1
Ž1	3,4	7,8	81,2	50,8	85,5	53,4
Ž2	3,5	8,3	96,4	60,3	94,0	58,8
Ž3	3,9	9,1	108,9	68,1	99,4	62,1
Ž4	4,0	9,4	96,4	60,3	94,3	58,9
Ž5	4,2	9,3	91,5	57,2	91,3	57,1
T1	3,7	8,5	107,9	67,4	94,6	59,1
T2	3,8	9,2	116,0	72,5	114,5	71,6
T3	3,6	8,2	101,8	63,6	107,8	67,4
T4	4,1	9,5	117,2	73,3	109,7	68,6
T5	4,2	9,4	110,1	68,8	98,2	61,4
A1	4,8	11,5	152,4	95,3	142,9	89,3
A2	5,0	11,8	130,4	81,5	141,2	88,3
A3	3,8	9,0	134,0	83,8	136,1	85,1
A4	4,7	11,8	147,3	92,1	138,4	86,5
A5	5,4	12,4	135,7	84,8	133,3	83,3
V1	3,5	7,7	117,4	73,4	65,5	40,9
V2	4,4	9,8	108,9	68,1	113,1	70,7
V3	3,5	7,8	119,7	74,8	77,0	48,1
V4	3,5	8,2	95,5	59,7	101,7	63,6
V5	3,8	8,9	96,1	60,1	100,3	62,7

Tabulka 8 - Vyhodnocení pevností v tlaku vzorků se struskou

Ozn. vzorku	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
R1	3,0	7,0	58,0	36,3	58,9	36,8
R2	2,9	6,5	58,9	36,8	56,7	35,4
R3	3,0	7,0	53,6	33,5	49,7	31,1
R4	2,8	6,7	49,3	30,8	36,8	23,0
R5	2,2	5,3	52,2	32,6	48,2	30,1
Ž1	3,4	7,6	62,2	38,9	61,8	38,6
Ž2	3,2	7,6	65,8	41,1	62,1	38,8
Ž3	3,0	6,9	57,2	35,8	61,6	38,5
Ž4	3,2	7,5	61,2	38,3	55,2	34,5
Ž5	3,3	7,5	57,4	35,9	58,8	36,8
T1	3,1	7,0	51,1	31,9	68,2	42,6
T2	3,1	7,2	64,0	40,0	60,2	37,6
T3	2,9	7,2	63,1	39,4	58,2	36,4
T4	3,3	8,0	79,4	49,6	73,8	46,1
T5	3,6	8,7	77,0	48,1	80,7	50,4
A1	3,8	8,6	78,0	48,8	78,0	48,8
A2	3,7	8,6	74,9	46,8	76,0	47,5
A3	4,0	9,4	74,6	46,6	80,1	50,1
A4	3,9	8,4	66,3	41,4	73,7	46,1
A5	4,1	9,8	72,9	45,6	76,7	47,9
V1	3,5	7,7	66,0	41,3	37,5	23,4
V2	2,8	6,5	73,2	45,8	72,0	45,0
V3	3,6	7,7	34,8	21,8	68,3	42,7
V4	3,4	8,2	41,2	25,8	76,4	47,8
V5	3,4	8,3	68,2	42,6	65,6	41,0

Tabulka 9 - Vyhodnocení pevností v tlaku vzorků s cementem

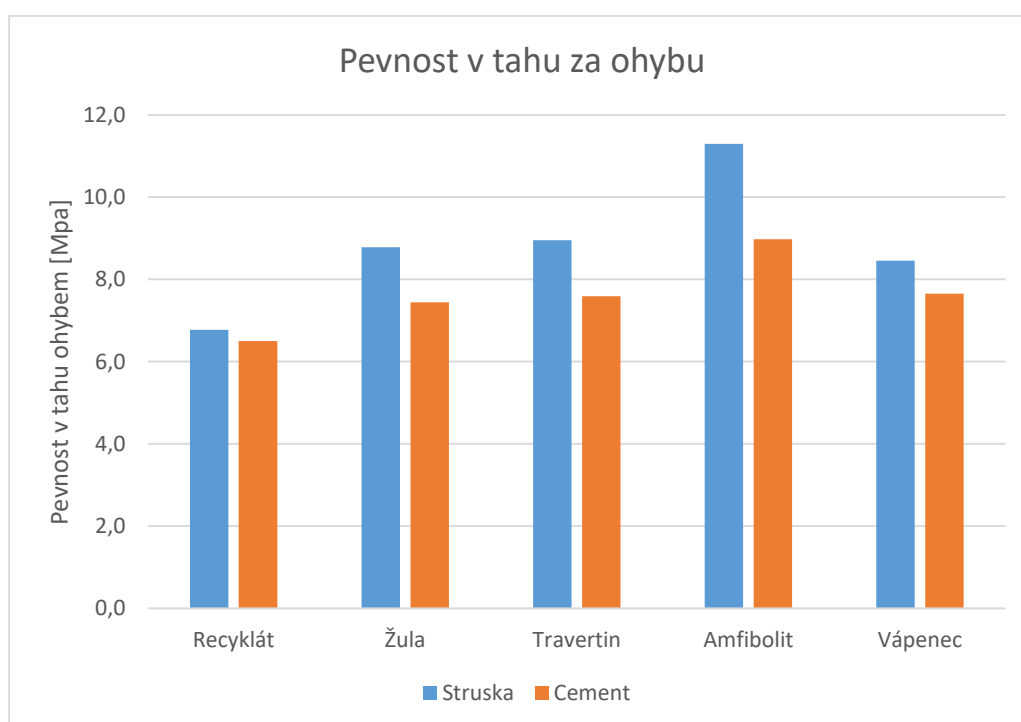
Druh horniny	Struska		Cement	
	Průměrná pevnost v tlaku za ohybu [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku za ohybu [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Recyklát	6,8	44,6	6,5	32,6
Žula	8,8	58,7	7,4	37,7
Travertin	9,0	67,4	7,6	42,2
Amfibolit	11,3	87,0	9,0	46,9
Vápenec	8,5	62,2	7,7	37,7

Tabulka 10 - Průměrné hodnoty pevností

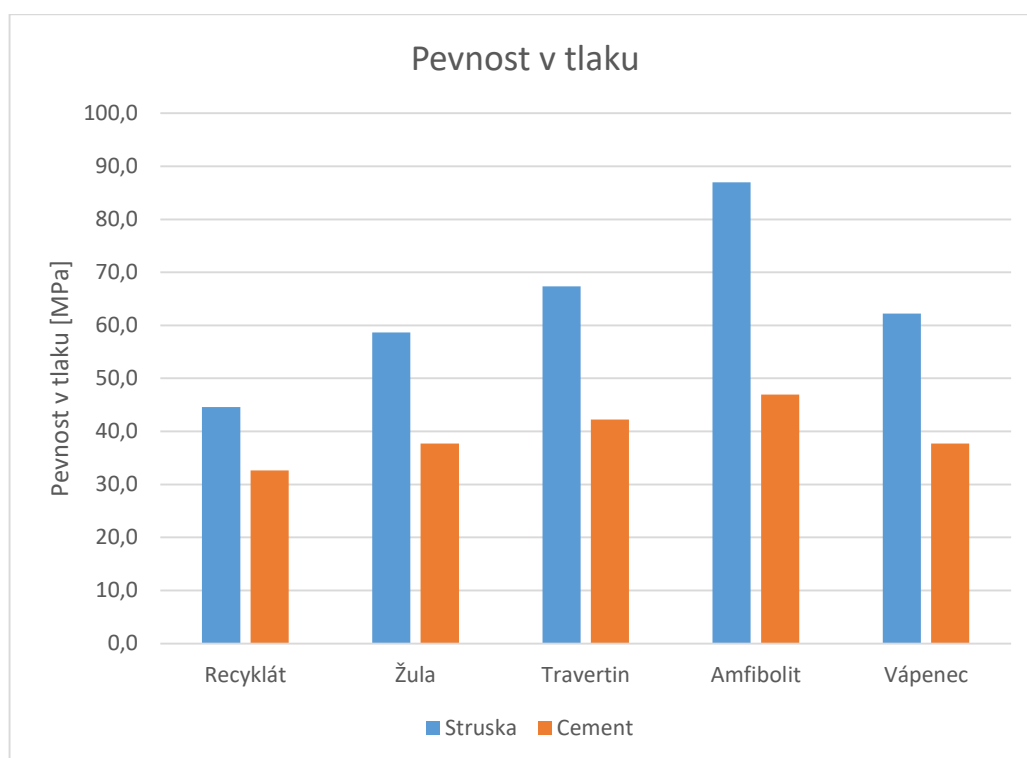
Tabulka 8 a Tabulka 9 znázorňují výsledky pevností. Výsledné hodnoty jsou vypočteny dle vzorců. Tabulka 10 obsahuje průměrné hodnoty pevností se zaokrouhlením na jedno desetinné číslo.

Graf 4 porovnává výsledky pevnosti v tlaku za ohybu směsí se struskou a s cementem. Vzorky se struskou vykazují vyšší výsledky o 5 – 25 %. Nejmenší rozdíl byl u vzorků s recyklátem, naopak nejvíc se lišila pevnost u vzorků s amfibolitem.

Graf 5 porovnává výsledky pevnosti v tlaku. Výsledky směsí se struskou jsou výrazně vyšší, konkrétně o 36 – 85 %.



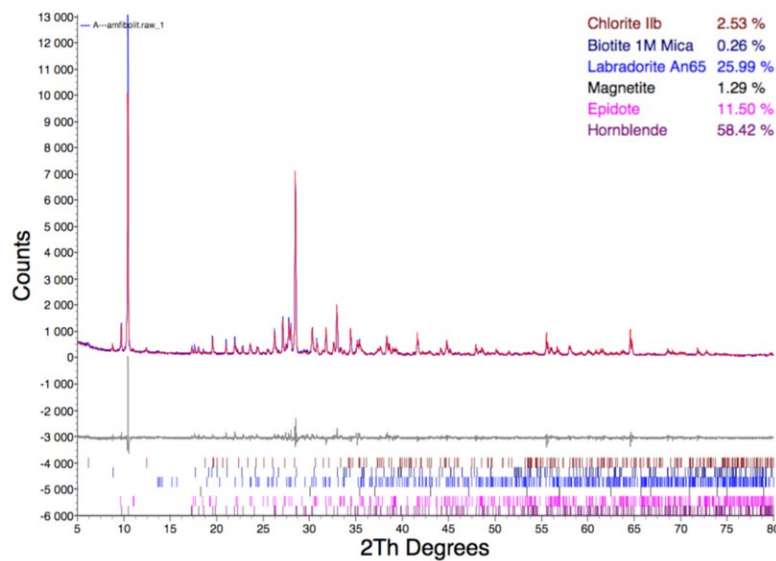
Graf 4 - Srovnání pevností v tahu za ohybu



Graf 5 - Srovnání pevností v tlaku

15.5 Výsledky práškové rentgenové difrakce

Rentgenová difrakce byla použita za účelem zjištění obsahu minerálů v jednotlivých horninách. Výsledkem každého zkoušení je difraktogram a textový soubor. Obrázek 22 je difraktogram amfibolitu. Všechny difraktogramy jsou v příloze diplomové práce. Hodnoty zastoupení jednotlivých prvků u difraktogramu nejsou přesné, údaje jsou brány z textových souborů, kde jsou hodnoty přesnější.



Obrázek 22 - Difraktogram amfibolitu

Složení jednotlivých minerálů bylo čerpáno z webu webmineral.com. [30]

15.5.1 Recyklát

Kvantitativní složení recyklátu	
Název složky	Obsah [%]
Gehlenit	54,61
Bredigit	21,39
Sádrovec	2,84
Křemen	3,53
Kalcit	10,06
Etringit	3,11
Bassanit	4,43

Tabulka 11 - Mineralogické složení recyklátu

Gehlenit – je bezbarvý, hnědý nebo nazelenalý minerál se skelným až matným povrchem. Oxidy vápenatý je zastoupen 40,90 %, oxid hlinitý 37,18 %. oxid křemičitý 21,91 %.

Bredigit – je minerál bezbarvý nebo šedý se skelným povrchem. Obsah minerálů je z 58,31 % oxid vápenatý, 5,99 % oxid hořečnatý, 35,70 % oxid křemičitý.

Sádrovec – je jednoklonný sedimentární minerál bílé, nažloutlé nebo nazelenalé barvy. Složení je z 32,57 % oxid vápenatý, 20,93 % voda a 46,50 % oxid sírový.

Křemen – je hnědý bezbarvý nebo šedý minerál se sklovitým povrchem s chemickým vzorcem SiO_2 . Jedná se o velmi běžný minerál, je složen ze 46,74 % z křemíku a z 53,26 % z kyslíku.

Etringit – je minerál, který vzniká při hydraulické reakci. Etringit obsahuje 26,81 % oxid vápenatý, 8,12 % oxid hlinitý, 45,93 % vázaná voda, 19,14 % oxid sírový.

Bassanit – je bezbarvý nebo sněhově bílý minerál nazývaný také hemihydrát. Obsah je 38,63 oxid vápenatý, 6,21 % voda, 55,16 % oxid sírový.

Recyklát je neznámého původu, pravděpodobně se jedná o recyklát struskového pojiva s čedičovým kamenivem.

15.5.2 Žula

Kvantitativní složení žuly	
Název složky	Obsah [%]
Křemen	33,07
Oligoclase	41,05
Chlorit	4,11
Biotit	4,37
Ortoklas	17,40

Tabulka 12 - Mineralogické složení žuly

Oligoclase – je minerál hnědé, nažloutlé nebo nazelenalé barvy se sklovitým povrchem. Obsah oxidů z 9,34 % oxid sodný, 4,23 % oxid vápenatý, 23,05 % oxid hlinitý a z 63,38 % oxid křemičitý.

Chlorit – minerál bílé až bílo-žluté barvy se sklovitým povrchem. Zastoupení složek v poměru 21,12 % oxid hlinitý, 44,77 % voda.

Biotite – minerál hnědé barvy s perlovým povrchem. Oxidy jsou v biotitu zastoupeny v poměru 10,86 % oxid draselný, 23,24 % oxid hořečnatý, 11,76 % oxid hlinitý, 8,29 % oxid železnatý, 41,58 % oxid křemičitý a 3,64 % vody.

Orthoklas – bezbarvý, nazelenalý nebo bílý minerál. Je složen z oxidu draselnatého 16,92 %, oxidu hlinitého 18,32 % a oxidu křemičitého 64,76 %.

15.5.3 Travertin

Kvantitativní složení travertinu	
Název složky	Obsah [%]
Kalcit	98,70
Křemen	0,99
Albit	0,33

Tabulka 13 - Mineralogické složení travertinu

Kalcite – neboli uhličitán vápenatý je bezbarvý nebo lehce zbarvený minerál. Jedná se o základní složku většiny hornin s chemickým vzorcem CaCO_3 . V kalcitu je z 56,03 % oxid vápenatý a ze 43,97 % oxid uhličitý.

Albit– podle názvu minerál vyznačující se svou bílou barvou s možnými nečistotami, které mění barvu. Složení 11,19 % oxid sodný, 1,07 % oxid vápenatý, 20,35 % oxid hlinitý a 67,39 % oxid křemičitý.

15.5.4 Amfibolit

Kvantitativní složení amfibolitu	
Název složky	Obsah [%]
Hornblendit	58,40
Epidot	11,50
Magnetit	1,29
Labradorit	26,00
Biotit	0,26
Chlorit	2,53

Tabulka 14 - Mineralogické složení amfibolitu

Hornblendit – tvrdý minerál černozeleňé barvy. Složení oxidů je v poměru 13,66 % oxid vápenatý, 19,63 % oxid hořečnatý, 10,86 % oxid hlinitý, 2,43 % oxid železitý, 51,22 % oxid křemičitý, 2,19 % voda

Epidote– tvrdý minerál žlutozeleňé, černé, žluté nebo šedé barvy s lesklým povrchem. Složení z 21,60 oxid vápenatý, 7,36 % oxid hlinitý, 34,60 % oxid železitý, 34,71 % oxid křemičitý, 1,73 % voda.

Magnetit – je minerál šedočerné až kovově černé barvy složením z 31,03 % oxid železitý, 68,97 % oxid hlinitý.

Labradorit– tvrdý minerál magmatického původu s šedou až nazelenalou barvou, složen z 4,56 % oxidem sodnatým, 12,38 % oxidem vápenatým, 30,01 % oxidem hlinitým, 53,05 % oxidem křemičitým.

15.5.5 Vápenec

Kvantitativní složení vápence	
Název složky	Obsah [%]
Kalcit	52,08
Dolomit	37,49
Křemen	10,43

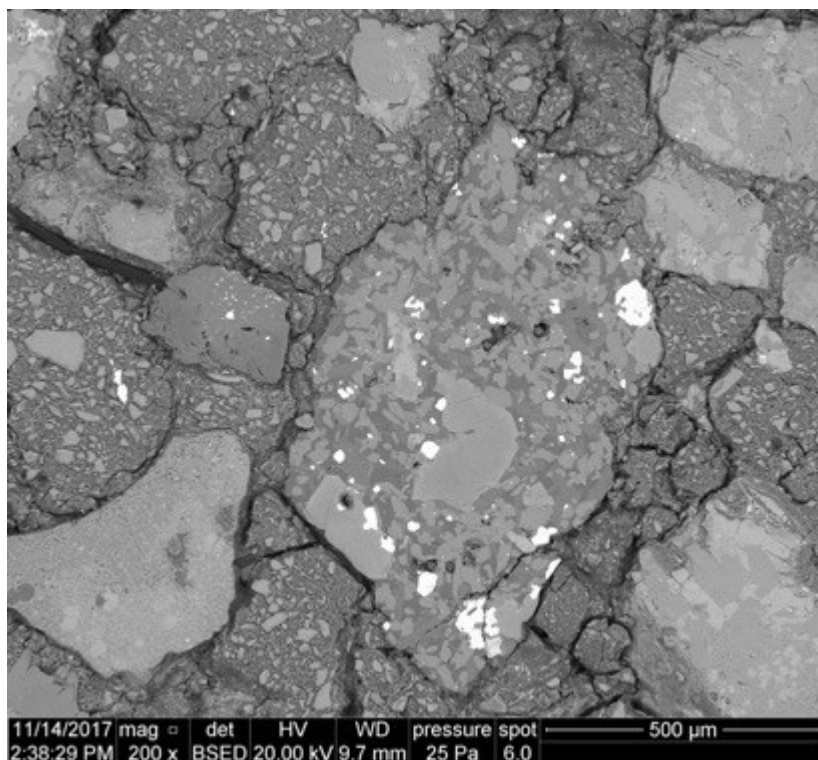
Tabulka 15 - Mineralogické složení vápence

Dolomit – je měkký minerál bílé, šedé nebo načervenalé barvy, složením 30,41 % oxid vápenatý, 21,86 % oxid hořečnatý, 47,73 % oxid uhličitý.

15.6 Výsledky mikroskopické analýzy

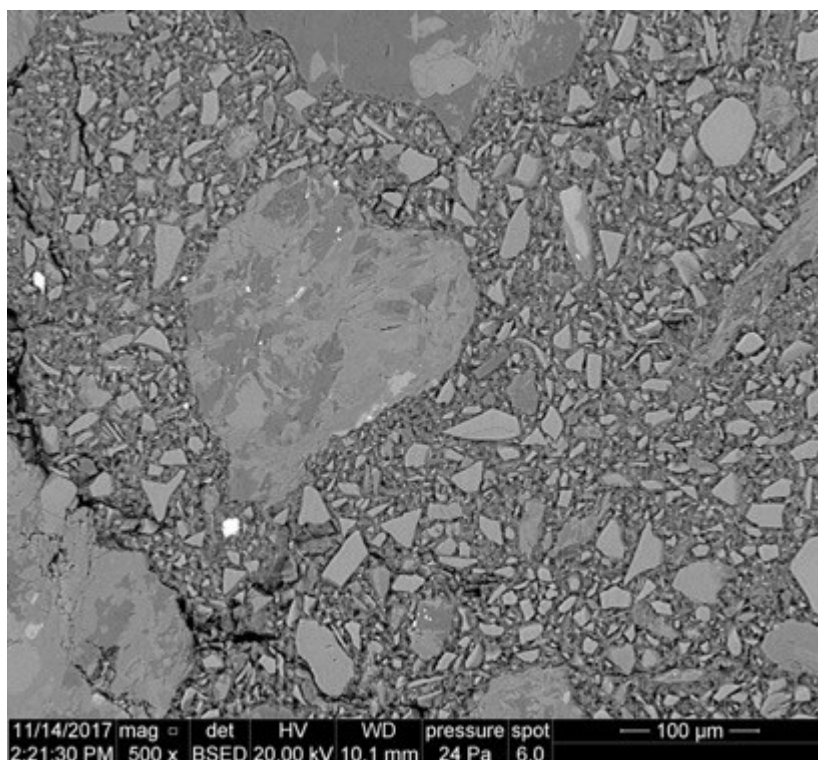
Výsledky mikroskopické analýzy jsou snímky zobrazující povrch vzorku. I přes složitou úpravu vzorků se nepodařilo dosáhnout ideálních podmínek pro provedení chemické analýzy na rozhraní zrna a pojiva. Problémem je vysoká pórovitost vzorků, kvůli které se nepodařilo dosáhnout vysokého vakua. Obrázky proto byly pořízeny za lehkého vakua, což znemožnilo provádění dalších analýz. Pro pořízení prvkového složení pomocí analýzy EDAX je potřeba velmi ostrých obrázků, které mohou vzniknout pouze za vysokého vakua.

Problémem se stala také metodika. V použitých literárních zdrojích není bohužel popsána metodika přípravy vzorků. Obrázek 23 ukazuje nedokonalost povrchové úpravy. Každá nepřesnost výsoce ovlivní výsledky složení.



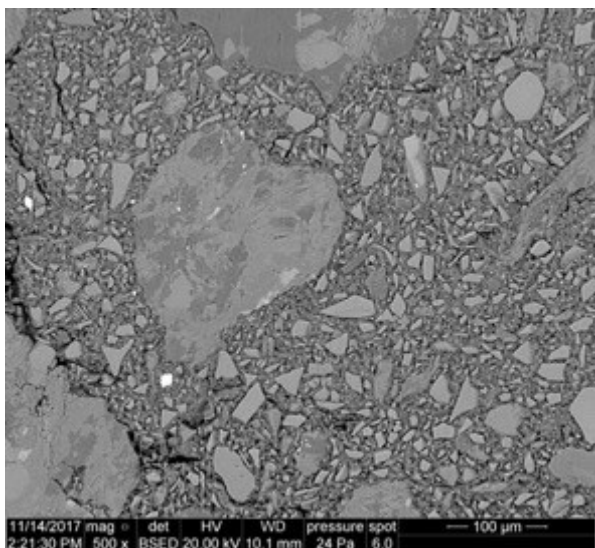
Obrázek 23 - Výsledek skenování vzorku recyklátu se struskou

Další problém s metodikou byl spojen s určením zkoumané vzdálenosti od hrany kameniva. Dle zdroje [31] byla zkoumaná vzdálenost na rozmezí od 0,1 – 1000 μm . Kvůli nízké přesnosti nebylo možné vzorky zkoušet na malých vzdálenostech. Velikost 1000 μm , tedy 1 mm, je také z reálného hlediska příliš velká. Jak znázorňuje Obrázek 24, zrna kameniva jsou vzdálená přibližně 100 μm , výsledkem by bylo složení kameniva.

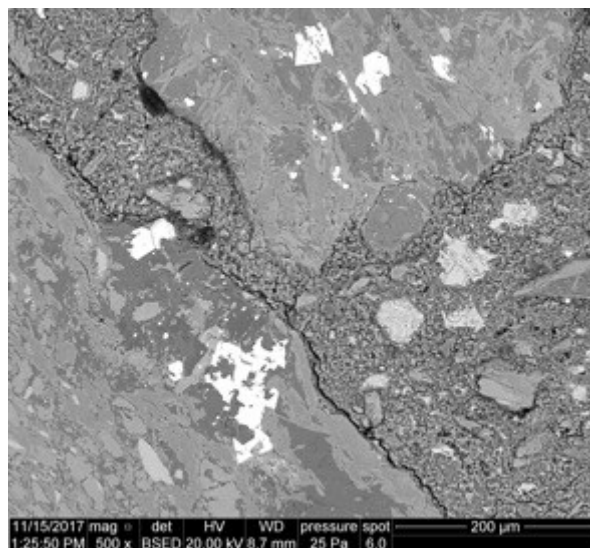


Obrázek 24 - Výsledek skenování vzorku s amfibolitem a aktivovanou struskou

Posledním problémem byl také charakter zkoušené oblasti. Nebylo známo, zda zkoušet bodově, na přímce, po celém obvodu nebo na ploše. V případě bodového zkoušení je překážkou přesnost mikroskopu, oblastí bodu může být jakákoliv nečistota. Při velkém počtu by bylo možné dojít k reprodukovatelnosti výsledků, i tak by byla nejistota obrovská. Pokud by byla zvolená přímková metoda, výsledky by byly opět velmi nepřesné, protože by přímka procházela menšími zrny kameniva a většími zrny pojiva. Při zkoušení na plochu by byly výsledky obdobně nepřesné.

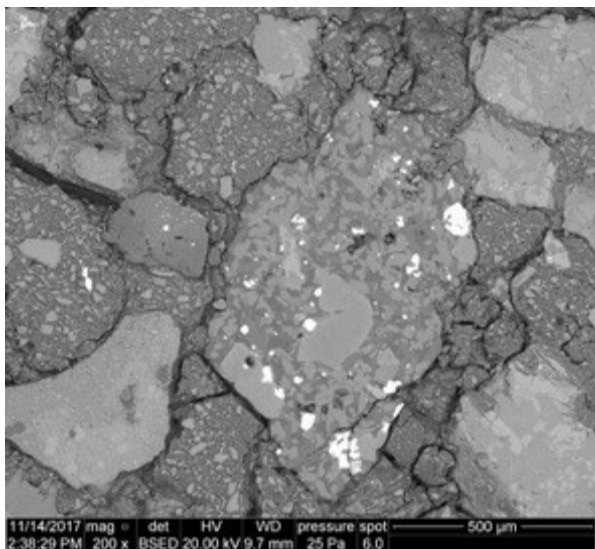


Obrázek 25 - Amfibolit se struskou

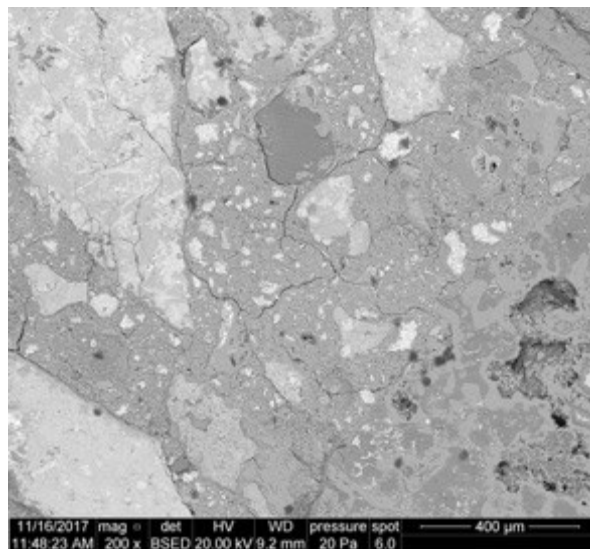


Obrázek 26 - Amfibolit s cementem

Obrázek 25a Obrázek 26 jsou vzorky s amfibolitem. Na obrázku se amfibolitu se struskou (Obrázek 25) lze vidět mnoho drobných částí a nečistot, které struska obsahuje, nelze vidět trhlinu na hraně zrno – pojivo. Na obrázku s cementem (Obrázek 26) lze vidět homogenní cement, který je občasné znečištěn menšími zrny kameniva, lze vidět trhlinu na pomezí zrno – pojivo. Na površích kameniva jsou různé barevné plochy, na kterých jde vidět pásková struktura. Výrazně světlejší plochy naznačují přítomnost železa.



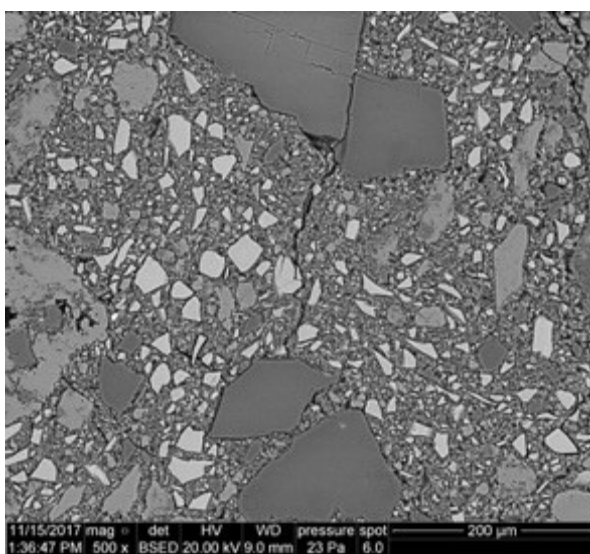
Obrázek 27 - Recyklát s aktivovanou struskou



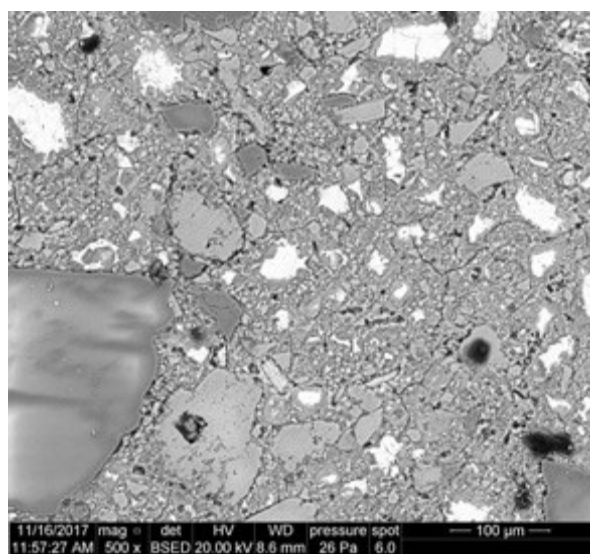
Obrázek 28 – Směs recyklátu s cementem

Obrázek 27a Obrázek 28 znázorňují vzorek s recyklátem při zvětšení 200x. I při malém zvětšení jsou vidět velké trhliny ve struktuře v obou vzorcích. Oba vzorky obsahují velké množství nečistot, definovány byly větší kusy nemleté strusky (světlejší zrna) a čediče (tmavší zrna), zrna jsou velmi rozdílná. Kusy nemleté strusky jsou pórovité, zrna čediče jsou naopak hutné.

Velké trhliny ve struktuře způsobily, že směs s recyklátem dosahovala nejnižších výsledků pevností.

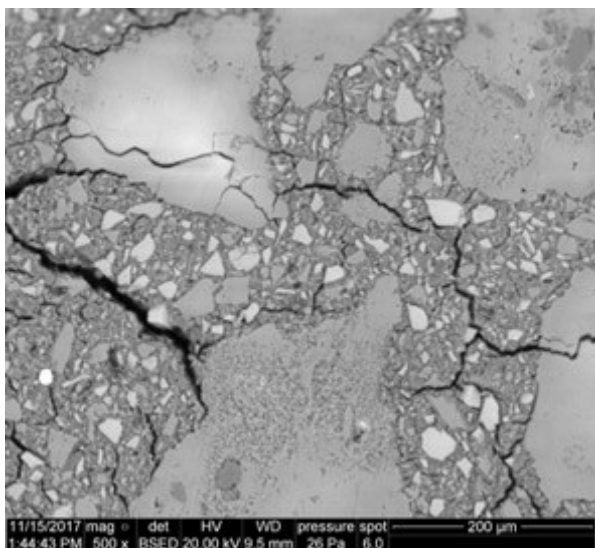


Obrázek 29- Krystalický vápenec s aktivovanou struskou

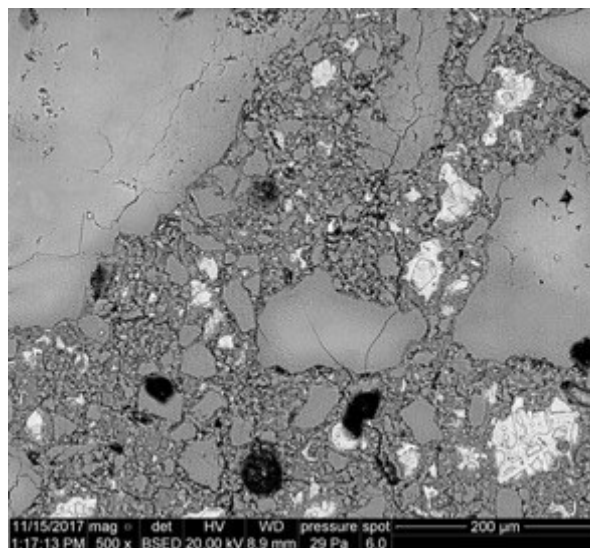


Obrázek 30–Směs krystalického vápence s cementem

Obrázek 29a Obrázek 30 jsou obrázky vzorků s krystalickým vápencem, zvětšeným 500x. Krystalický vápenec byl podle výsledků difrakce (Tabulka 15) velmi dolomitický, na obrázcích lze definovat dolomitické (tmavší) a vápencové (světlejší) zrna. U vzorku s cementem (Obrázek 30) nejsou trhliny na rozhraní zrno – pojivo tak zřejmé jako v předešlých případech.

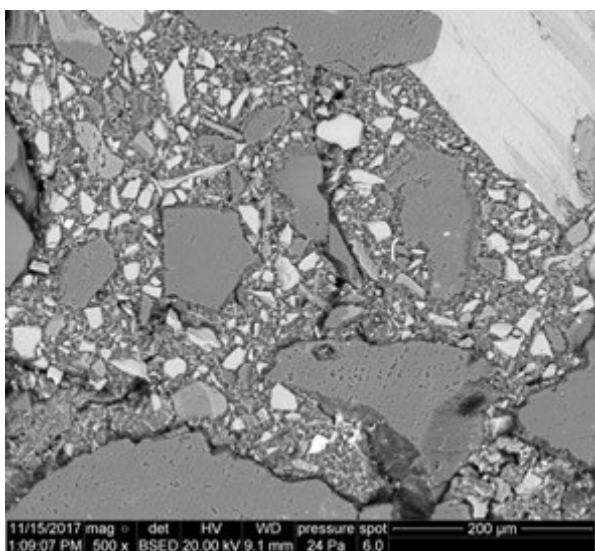


Obrázek 31 - Travertin s aktivovanou struskou

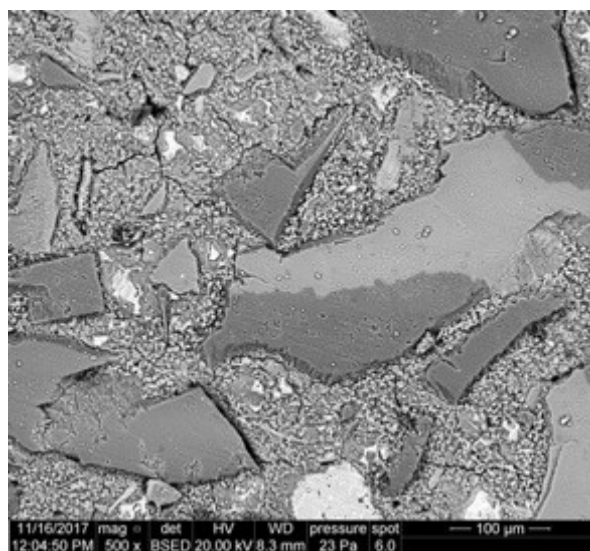


Obrázek 32–Směs travertinu s cementem

Vzorky s travertinem (Obrázek 31, Obrázek 32) zobrazují popraskaná zrna kameniva. Pevnostní výsledky směsí s travertinem nejsou špatné. Je pravděpodobné, že trhliny vznikly při úpravě vzorků, travertin byl zdegradovaný a křehký.



Obrázek 33 - Žula s aktivovanou struskou



Obrázek 34–Směs žuly s cementem

Na vzorcích se žulou (Obrázek 33 Obrázek 34) se projevila nedokonalost povrchové úpravy, kdy lze pozorovat vybroušené pojivo a odhalená zrna výrazně tvrdší žuly. Ve vzorcích s cementem lze opět pozorovat trhliny ve struktuře pojiva.

16 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo pokusit se na vybraných vzorcích popsat chemické změny na rozhraní pojivo plnivo a porovnat tyto výsledky s mechanickými parametry vyrobených směsí.

Pro analýzu byla použita řada metod, konkrétně rentgenová prášková difrakce a skenování pomocí elektronového mikroskopu. Mechanické vlastnosti byly prováděny podle platných norem. Zjištěny byly také základní vlastnosti použitého kameniva.

Na výrobu vzorků bylo použito 5 druhů kameniva a 2 druhy pojiva. Byly použity 4 druhy hornin – žula, amfibolit, krystalický vápenec, travertin a také stavební recyklát. Jako pojivo byla použita struska a cement. Celkově bylo vyrobeno 60 trámečků velikosti 40 x 40 x 160 mm.

Před samotným namícháním se kamenivo muselo pomlít na požadovanou frakci, kterou požaduje použitá zkušební norma. Výsledné kamenivo frakce 0,25 – 0,5, 0,5 – 1, 1 - 2 mm bylo zkoušeno na objemovou hmotnost, měrnou hmotnost a nasákavost. Vlastnosti kameniv se výrazně lišily. Kamenivo žuly a amfibolitu bylo těžší a méně nasákavé, kamenivo recyklátu, krystalického vápence a travertinu bylo lehčí a více nasákavé. Vzhledem k typu hornin však byly tyto výsledky očekávané.

Na trámečcích byly provedeny zkoušky na mechanické vlastnosti po 28 dnech zrání. Byly provedeny zkoušky na pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem. Směsi se struskou vykazovaly vyšší pevnosti v tahu za ohybu o 5 – 25 %, pevnosti v tlaku byly vyšší o 36 – 85 %. Pevnosti v tahu ohybem směsí s portlandským cementem se pohybovali mezi 6,5 – 9,0 MPa, pevnosti v tlaku 32,64 – 46,95 MPa. Pevnosti v tahu za ohybu směsí s aktivovanou struskou byly v rozsahu 6,8 – 11,3 MPa, pevnosti v tlaku 44,6 – 87,0 MPa. Nejvyšších hodnot dosahovaly směsi s amfibolitem, nejnižších směsi s recyklátem.

Na vzorcích kameniva byla provedena rentgenová difrakční analýza, která odhalila přesné mineralogické složení použitých hornin.

I po složité úpravě povrchu vzorků pro skenování elektronovým mikroskopem nebylo dosaženo dobrého zaostření, proto nebylo prováděno chemické složení v ITZ. V průběhu

přípravy vzorků nastaly obtíže s metodikou vhodné úpravy povrchu. Závěrem tedy je, že nebylo možné provést analýzu v rozsahu, ve kterém bylo plánováno. Byly pořízeny snímky se zvětšením 200x, 500x a 1000x. Byly porovnány vzorky s aktivovanou struskou a vzorky s portlandským cementem.

Aby bylo možno provést chemické složení pomocí analýzy EDAX, musela by se provést dokonalejší povrchová úprava, která by ze vzorků odstranila pórovitost. Problémové bylo také určit vzdálenosti, ve kterých mělo být zkoumáno chemické složení, a to především kvůli přítomnosti drobného kameniva. Tento problém se dá odstranit použitím pouze větší frakce kameniva. Další možností je vyrobit výbrus, což je velmi tenký, průhledný vzorek, jehož zhotovení je velmi náročné.

K běžnému použití betonů na bázi alkalicky aktivovaných směsí je potřeba ještě mnoho výzkumu. Ve výzkumu vlivu kameniva na alkalicky aktivovanou směs bych rád pokračovat v doktorandském studiu.

Poděkování: Děkuji Ing. Pavlu Mecovi za pomoc při vedení diplomové práce. Mé poděkování patří též Ing. Lucii Gembalové Ph.D, za poskytnuté rady, informace, odborné vedení a připomínky ke zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Dr. Ing. Daliborovi Matýskovi, Ing. Davidu Bujdošovi a Bc. Janě Stejskalové za pomoc v laboratoři. Opomenout nemohu ani svou rodinu a své přátele za morální podporu při psaní práce a během celého studia.

Diplomová práce prezentuje znalosti nabyté v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin - Projekt udržitelnosti. Identifikační kód: LO1406. Projekt je podporován Národním programem udržitelnosti financovaném ze státního rozpočtu ČR.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1008. Záměsová voda do betonu- Specifikace pro odběr vzorků a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané pro recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Český normalizační institut. 2003
- [2] ČSN EN 1097 - 6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Český normalizační institut, 2014.
- [3] ČSN EN 1097 - 7. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška. Český normalizační institut, 2008
- [4] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu-stanovení pevnosti. Český normalizační institut. 2005
- [5] ČSN EN 1542. Nedestruktivní zkoušení betonu- Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2000
- [6] Cement [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement
- [7] CO TĚŽÍME. Lom Litice [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.lomlitice.cz/>
- [8] ČESKÁ ROZVOJOVÁ AGENTURA, O.P.S. Současný stav výzkumu v oblasti geopolymérů. 2005, 181 s.
- [9] DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymer: chemistry. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymère, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9.
- [10] Davidovits Joseph , Properties of Geopolymer Cements, in: P.V. Krivenko (Ed.), Proceedings of First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1, 1994, pp. 131–149.
- [11] DOLEŽAL, Josef, František ŠKVÁRA a Pavel SVOBODA. Concrete based on fly ash geopolymers [online]. 2006, 185 - 197 [cit. 2017-11-19].
- [12] D.P. Bentz, Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials: II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity, Cem. Concr. Res. 30 (2000) 1121 – 1129
- [13] GAO, Kang, Kae-Long LIN, DeYing WANG, Chao-Lung HWANG, Bui Le ANH TUAN, Hau-Shing SHIU a Ta-Wui CHENG. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated

characteristics of metakaolin-based geopolymers[online]. [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.027. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.027. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813006417>

[14] GRANIZO ML. Activation alcalina de metacaolin: desarrolllo de nuevos materials cementantes. PhD thesis, University Autonoma of Madrid, 1998 [only in Spanish].

[15] GREGOROVÁ, M. PVE Dlouhé Stráně – oprava AB pláště horní nádrže petrograficko - mineralogicko - geochemické posouzení. MU Brno, 2004.

[16] FAIMON, J. Oscillatory silicon and aluminum aqueous concentrations during experimental aluminosilicate weathering, *Geochim. Cosmochim. Acta* 60 (1996)2901–2907

[17] LI, Chao, Henghu SUN, Longtu LI, Chao-Lung HWANG, Bui Le ANH TUAN, Hau-Shing SHIU a Ta-Wui CHENG. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si Ca) and metakaolin (Si Al) cements[online]. [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. ISBN 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>

[18] L. Struble, J. Skalny, S. Mindess, A review of the cement–aggregate bond, *Cem. Concr. Res.* 10 (1980) 277 – 286

[19] MLČOCH, Petr. Výzkum, návrh a verifikace progresivních technologií pro efektivnější zpracování strusek : Výzkumný úkol č. TTÚ – 416/A12. Třinec : Třinecké železářny, a.s., 2006.

[20] PALOMO A, Grutzeck MW, Blanco MT. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. *Cement Concrete Res* 1999;29:1323–9.

[21] PLÁČEK, Vladimír. Strusky : Požadavky na vysokopecní a ocelářenskou strusku z hlediska využití ve stavebnictví. Informace Českého svazu stavebních inženýrů [online]. 2007, č. 4, Prosinec [cit. 2010-3-16]. Dostupný na WWW: . ISSN 1213-4112

[22] Praktika z geologie [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/>

[23] ROTOVÁ, Petra. Využití stavebního recyklátu v dopravních stavbách. Praha, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze.

- [24] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Blast furnace slag utilization for non-traditional applications. Recycling 2003 : Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [25] SHAFIEI, Kasra a Bernd HILLEMEIER. Feasibility of plasma technology utilization in concrete industry [online]. Brno, 2014, , 9 [cit. 2016-04-25]. ISSN 2319-1163.
- [26] Svoboda, Luboš (2013). Stavební hmoty (volně dostupná elektronická kniha), 950. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [27] TOPINKOVÁ, M. Možnosti modifikace hydratačních procesů v alkalicky aktivovaných pojivech. Diplomová práce, Ostrava: FMMI VŠB-TUO, 85 s. 2011.
- [28] VLČEK, J. Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace. Habilitační práce. Ostrava. MS FMMI VŠB-TUO, 101 s. (2008)
- [29] VLČEK, Jozef aj. Výzkum a vývoj nových možností environmentálního zpracování hutních odpadů, recyklace druhotných surovin : Průběžná zpráva řešení projektu MPO ČR č. FI-IM5/123. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 2009.
- [30] Webmineral.com: Mineralogy Database [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://webmineral.com/>
- [31] W.K.W. Lee, J.S.J. van Deventer Cement and Concrete Research 34 (2004) 195–206
- [32] Želešice - Amfibolit. Mendelu.cz [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://techdrev.ldf.mendelu.cz/cz/vyma/pedo/loma/pdk-p/p090>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Teoretická struktura geopolymery [10]	3
Obrázek 2 - Fázový diagram strusky $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [29]	5
Obrázek 3 - Produkty vzniklé při prvním kroku alkalické aktivace vysokopecní strusky [10] .	7
Obrázek 4 - Produkty alkalické aktivované strusky [10]	8
Obrázek 5 - Mění se poměr $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ při změně vzdálenosti od zrna kameniva [31].....	9
Obrázek 6 - Litická žula[7]	11
Obrázek 7 - Krystalický vápenec [22].....	13
Obrázek 8 - Travertin [22]	13
Obrázek 9 - Drtič firmy Retsch, na kterém probíhalo mletí.....	15
Obrázek 10 - Míchačky firmy BetonSystém s. r. o.	17
Obrázek 11 - Vzorky kameniva před vložením do sušárny	18
Obrázek 12 - Připravené vzorky před vložením do exikátoru	20
Obrázek 13 - Zkoušení vzorků na pevnost v tahu ohybem	21
Obrázek 14 - Zkoušení vzorků na pevnost v tlaku.....	23
Obrázek 15 - Rentgenový difraktometr Bruker-AXD D8 Advance	24
Obrázek 16 - Skenování povrchově neupraveného vzorku, zvětšení 8000x.....	25
Obrázek 17 - Výsledek skenování broušeného a pokovaného vzorku.....	26
Obrázek 18 - Kotoučová bruska na kameny	26
Obrázek 19 - kotoučová bruska s leštícím kotoučem.....	27
Obrázek 20 - Nabroušené a vyleštěné vzorky	27
Obrázek 21 - Detail vyleštěného vzorku směsi s aktivovanou struskou a amfibolitem.....	28
Obrázek 22 - Difraktogram amfibolitu.....	38
Obrázek 23 - Výsledek skenování vzorku recyklátu se struskou.....	42
Obrázek 24 - Výsledek skenování vzorku s amfibolitem a aktivovanou struskou	43

Obrázek 25 - Amfibolit se struskou	44
Obrázek 26 - Amfibolit s cementem	44
Obrázek 27 - Recyklát s aktivovanou struskou	44
Obrázek 28 - Směs recyklátu s cementem	44
Obrázek 29 - Krystalický vápenec s aktivovanou struskou	45
Obrázek 30 - Směs krystalického vápence s cementem.....	45
Obrázek 31 - Travertin s aktivovanou struskou	46
Obrázek 32 - Směs travertinu s cementem.....	46
Obrázek 33 - Žula s aktivovanou struskou.....	46
Obrázek 34 - Směs žuly s cementem	46

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přibližné chemické složení vysokopecních strusek [19]	5
Tabulka 2 - Technologické vlastnosti strusky [16]	6
Tabulka 3 - Složení portlandského cementu [26].....	10
Tabulka 4 - výsledky měrné hmotnosti fileru kameniva.....	29
Tabulka 5 - výsledky základních vlastností kameniva.....	30
Tabulka 6 - Rozměry a objemová hmotnost vzorků se struskou	31
Tabulka 7 - Rozměry a objemové hmotnosti vzorků s cementem	32
Tabulka 8 - Vyhodnocení pevností v tlaku vzorků se struskou	34
Tabulka 9 - Vyhodnocení pevností v tlaku vzorků s cementem	35
Tabulka 10 - Průměrné hodnoty pevností	35
Tabulka 11 - Mineralogické složení recyklátu	38
Tabulka 12 - Mineralogické složení žuly	39
Tabulka 13 - Mineralogické složení travertinu	40

Tabulka 14 - Mineralogické složení amfibolitu	40
Tabulka 15 - Mineralogické složení vápence.....	41

Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání měrné hmotnosti kameniva	29
Graf 2 - Porovnání objemové hmotnosti a nasákavosti.....	30
Graf 3 - Porovnání objemové hmotnosti trámečků	33
Graf 4 - Srovnání pevností v tahu za ohybu.....	36
Graf 5 - Srovnání pevností v tlaku	37

Seznam vzorců

Vzorec 1 - Vzorec pro určení modulu zásaditosti	6
Vzorec 2 - Vzorec pro výpočet objemové hmotnosti kameniva	18
Vzorec 3 - Vzorec pro výpočet nasákavosti kameniva	19
Vzorec 4 - Vzorec pro výpočet měrné hmotnosti kameniva.....	20
Vzorec 5 - Vzorec pro výpočet pevnosti v tahu ohybem	22
Vzorec 6 - Vzorec pro výpočet pevnosti v tlaku.....	23

Seznam příloh

Příloha 1 - Certifikát shody mleté granulované vysokopecní strusky.....	58
Příloha 2 - Osvědčení o stálosti vlastností	59
Příloha 3 - Difraktogram amfibolu.....	60
Příloha 4 - Difraktogram stavebního recyklátu	61
Příloha 5 - Difraktogram krystalického vápence.....	62
Příloha 6 - Difraktogram travertinu.....	63
Příloha 7 - Difraktogram žuly	64



® TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.
Technical and Test Institute for Construction Prague

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Certifikační orgán, Notifikovaná osoba, Inspekční orgán
Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Certification Body, Notified Body, Inspection Body
Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

ES CERTIFIKÁT SHODY

č. 1020 – CPD – 070037230

V souladu se směrnicí 89/106/EHS Rady Evropských společenství ze dne 21. prosince 1988 o sbližování právních a správních předpisů členských států týkajících se stavebních výrobků (směrnice o stavebních výrobcích – CPD), ve znění směrnice 93/68/EHS Rady Evropských společenství ze dne 22. července 1993, se potvrzuje, že stavební výrobek:

Výrobek

**Mletá granulovaná vysokopecní struska
pro použití do betonu, malty a injektážní malty dle EN 15167-1**

který uvedl na trh:

KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.
Štramberk 500, 742 67 Ženklava
IČ: 47972165
Česká republika

a byl vyroben:

KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.
Štramberk 500, 742 67 Ženklava
IČ: 47972165
Česká republika

je u výrobce podrobován řízení výroby a dalším zkouškám vzorků odebraným v místě výroby předepsaným způsobem a že notifikovaná osoba

Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p.

provedla počáteční zkoušky příslušných charakteristik typu výrobku, počáteční inspekci v místě výroby a systému řízení výroby a vykonává průběžný dohled, posuzování a schvalování systému řízení výroby a auditní zkoušky vzorků odebraných v místě výroby, na trhu nebo na staveništi.

Tento certifikát prokazuje, že byla uplatněna všechna ustanovení týkající se prokazování shody a všechny ukazatele popsané v příloze ZA normy

EN 15167-1:2006


a že výrobek splňuje všechny předepsané požadavky.

Tento certifikát byl poprvé vydán 14. května 2009 a zůstává v platnosti tak dlouho, pokud se podmínky stanovené v harmonizované technické specifikaci, na niž byl uveden odkaz, nebo výrobní podmínky v místě výroby či systém řízení výroby sám výrazně nezmění.

Razítko notifikované osoby 1020

Ostrava, 14. května 2009




Ing. Olivier Částka
zástupce vedoucího notifikované osoby



TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.
Technical and Test Institute for Construction Prague

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznámený subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán / Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body, Prosecká 911/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

Oznámený subjekt 1020

OSVĚDČENÍ O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ

certifikát

č. 1020 – CPR – 070037230

V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích - CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:

**Mletá granulovaná vysokopecní struska
pro použití do betonu, malty a injektážní malty dle EN 15167-1**

který byl vyroben výrobcem:

KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.
Libotín 500, 742 66 Štramberk
IČ: 47972165
Česká republika

a byl vyroben ve výrobě:

KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.
Libotín 500, 742 66 Štramberk
Česká republika

**Toto osvědčení prokazuje, že byla uplatněna všechna ustanovení týkající se posuzování
a ověřování stálosti vlastností a vlastností popsanych v příloze ZA normy**

EN 15167-1: 2006

v rámci systému 1+ a že

výrobek splňuje všechny výše stanovené požadavky.

Toto osvědčení bylo poprvé vydáno 14. 5. 2009 jako certifikát podle CPD a platí, dokud se nezmění zkušební metody a/nebo požadavky na systém řízení výroby obsažené v harmonizované normě použité při posuzování vlastností deklarovaných charakteristik a pokud se výrazně nezmění výrobek a/nebo výrobní podmínky v místě výroby.

Razítko oznámeného subjektu

Ostrava 26. srpna 2013



Ing. Vojtěch Šebek

zástupce vedoucího oznámeného subjektu

